



Universidad de Cuenca
Facultad de Arquitectura y Urbanismo

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA EN LA ESCUELA PAULISTA BRUTALISTA:

ESTUDIO DE CASOS



Universidad de Cuenca
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Carrera de Arquitectura

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA EN LA ESCUELA PAULISTA BRUTALISTA: ESTUDIO DE CASOS

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Arquitecto

AUTOR:

Pedro Esteban Astudillo Sacoto
0105544027
astvdillo@gmail.com

DIRECTOR:

Ing. Hernán Alfredo García Erazo
0102116654

Cuenca-Ecuador
27 Enero 2021

RESUMEN

El aprendizaje del aspecto estructural en la arquitectura suele paradójicamente dissociarse de la disciplina al abordarse únicamente desde el punto de vista de la ingeniería, que no considera el potencial de lo estructural en la obra arquitectónica. El *Brutalismo Paulista* al tratarse de un estilo arquitectónico, cuyos diseños surgen a partir del conocimiento de la técnica como “sustancia primera” junto con la historia en palabras de Paulo Mendes da Rocha (2011), requiere de una aproximación que converja el conocimiento de estas dos profesiones.

Mendes da Rocha (2011) destaca la importancia del Brutalismo Paulista como “modo de conocimiento peculiar”, que sobresale por su eficiencia, y que debido a su “carácter reflexivo”, requiere de otras disciplinas, como es el caso de la ingeniería del cual se encarga el presente trabajo.

El *Brutalismo Paulista* se expresa en formas que muestran una experimentación de las tipologías estructurales, por lo que se considera como necesario abordar las obras de Vilanova Artigas y Mendes da Rocha desde una perspectiva arquitectónica-estructural para un análisis integral.

Este trabajo de titulación hace hincapié mediante estudios de caso, en la estructura para generar forma, que es entendida a partir de una aproximación histórica, arquitectónica, del sistema estructural y del desempeño estructural.

Con respecto a este último análisis, se emplea el método de elementos finitos para discutir la eficiencia de las formas, que permite dar cuenta del potencial de esta herramienta en el diseño arquitectónico.

Palabras clave:

Brutalismo Paulista. Vilanova Artigas. Mendes da Rocha. Estructura. Método de los elementos finitos. Forma.



ABSTRACT

The learning of the structural aspect in architecture is often paradoxically dissociated from the discipline as it is approached only from the point of view of engineering, which does not consider the potential of the structural in the architectural work. Paulista Brutalism, being an architectural style, whose designs arise from the knowledge of technique as "first substance" along with history in the words of Paulo Mendes da Rocha (2011), requires an approach that converges the knowledge of these two professions.

Mendes da Rocha (2011) highlights the importance of the *Paulista Brutalism* as a "peculiar mode of knowledge", which stands out for its efficiency, and which due to its "reflective character", requires other disciplines, as is the case of engineering, which is the subject of this paper.

The *Paulista Brutalism* is expressed in forms that show an experimentation of the structural typologies, so it is considered as necessary to approach the works of Vilanova Artigas and Mendes da Rocha from an architectural-structural perspective for an integral analysis.

This degree work emphasizes, through case studies, the structure to generate form, which is understood from a historical, architectural, structural system and structural performance approach.

With regard to this last analysis, the finite element method is used to discuss the efficiency of the shapes, which makes it possible to account for the potential of this tool in architectural design.

Keywords:

Paulista Brutalism. Vilanova Artigas. Mendes da Rocha. Structure. Finite element method. Form.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
CLÁUSULAS DE IDONEIDAD.....	12
DEDICATORIA.....	14
AGRADECIMIENTO.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
OBJETIVOS.....	17

Capítulo.1: La arquitectura y estructura

1.1 APROXIMACIÓN A LA ESTRUCTURA DESDE LA TIPOLOGÍA	22
1.1.1 Julien-David Le Roy: el tipo como clasificación.....	22
1.1.1.1 Templos egipcios, hebreos y fenicios.....	23
1.1.1.2 Templos griegos y romanos.....	24
1.1.1.3 Templos cristianos.....	28
1.1.2 Jean-Nicolas-Louis Durand: el tipo como diagrama.....	28
1.1.3 Movimiento Moderno: el tipo como prototipo.....	30
1.1.3.1 Charles-Édouard Jeanneret-Gris (Le Corbusier).....	30
1.1.3.2 Ludwig Mies van der Rohe.....	32
1.2 APROXIMACIÓN A LA ESTRUCTURA DESDE EL MATERIAL.....	34
1.2.1 Tectonicidad y estereotomía.....	35
1.2.1.1 Estereotómica de la masa.....	36
1.2.1.2 Tectónica de la trama.....	36
1.2.2 Materiales estructurales.....	37
1.2.2.1 Hormigón armado.....	37
1.2.2.1.1 Características.....	37



1.2.2.1.2 Arreglos (Clasificación de Andrea Deplazes).....	38
1.2.2.2 Mampostería.....	38
1.2.2.3 Madera.....	40

Capítulo 2: La estructura en la arquitectura

2.1 HISTORIA DE LA RELACIÓN ARQUITECTO-INGENIERO.....	44
2.1.1 Relación arquitecto-ingeniero y el desarrollo de la forma estructural.....	45
2.1.1.1 Monólogo.....	45
2.1.1.2 Soliloquio.....	46
2.1.1.3 Diálogo.....	46
2.2 ENSEÑANZA DE ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS.....	48
2.3 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS.....	52
2.3.1 Estructuras y elementos estructurales.....	52
2.3.1.1 Comportamiento de un sistema de sección activa.....	52
2.3.2 Conceptos básicos.....	54
2.3.2.1 Fuerza.....	54
2.3.2.2 Momento.....	54
2.3.2.3 Condiciones de equilibrio.....	54
2.3.2.4 Grados de libertad.....	55
2.3.2.5 Rigidez.....	55
2.3.3 Propiedades del sistema estructural.....	56
2.3.3.1 Propiedades geométricas.....	56
2.3.3.1.1 Propiedades seccionales.....	56
2.3.3.2 Propiedades mecánicas (elásticas).....	56
2.3.3.1.1 Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.....	57
2.3.4 Requisitos de resistencia, rigidez y estabilidad.....	58
2.3.4.1 Esfuerzo (Tensión mecánica).....	58

2.3.4.2 Desplazamientos.....	58
2.3.5 Análisis dinámico.....	58
2.3.5.1 Análisis modal.....	58
2.3.5.1.1 Vibración.....	58
2.3.5.1.2 Amortiguamiento.....	59
2.3.5.2 Análisis espectral.....	59
2.4 MÉTODO DE ANÁLISIS.....	60
2.4.1 Método de Elementos Finitos.....	60
2.4.2 Definición de elemento finito.....	60
2.4.3 Procedimiento para el análisis del Método de Elementos Finitos.....	60
2.4.3.1 Clasificación del problema.....	60
2.4.3.1.1 Modelo conceptual de la estructura.....	60
2.4.3.1.2 Modelo matemático o estructural.....	61
2.4.3.2 Solución en MATLAB vía StaBIL.....	62
2.4.3.2.1 Pre-proceso.....	62
2.4.3.2.2 Proceso.....	62
2.4.3.2.3 Post-proceso.....	63

Capítulo 3: Escuela Paulista Brutalista: estudios de caso

3.1 BRUTALISMO PAULISTA.....	66
3.2 JOÃO BATISTA VILANOVA ARTIGAS.....	69
3.2.1 Biografía.....	69
3.2.2 Pensamiento.....	72
3.3 PAULO ARCHÍAS MENDES DA ROCHA.....	74
3.3.1 Biografía.....	74
3.3.2 Pensamiento.....	76
3.4 ESTUDIOS DE CASO.....	82



3.4.1 Gimnasio Estatal de Itanhaém.....	83
3.4.1.1 Análisis histórico.....	83
3.4.1.2 Análisis arquitectónico.....	92
3.4.1.3 Análisis del sistema estructural.....	93
3.4.1.4 Análisis estructural.....	101
3.4.1.4.1 Construcción del modelo.....	101
3.4.1.4.2 Interpretación del modelo.....	102
a) Análisis modal.....	102
b) Espectro.....	112
c) Esfuerzos normales.....	112
d) Desplazamientos: deriva.....	121
e) Participación de la masa.....	121
3.4.1.5 Síntesis de la forma.....	121
3.4.2 Casa en Butantã.....	123
3.4.2.1 Análisis histórico.....	123
3.4.2.2 Análisis arquitectónico.....	125
3.4.2.3 Análisis del sistema estructural.....	127
3.4.2.4 Análisis estructural.....	136
3.4.2.4.1 Construcción del modelo.....	136
3.4.2.4.2 Interpretación del modelo.....	138
a) Análisis modal.....	138
b) Espectro.....	145
c) Esfuerzos normales.....	145
d) Desplazamientos: deriva.....	146
e) Participación de la masa.....	161
3.4.2.5 Síntesis de la forma.....	161
3.4.3 Pabellón de Brasil en Osaka.....	163
3.4.2.1 Análisis histórico.....	163

3.4.2.2 Análisis arquitectónico.....	169
3.4.2.3 Análisis del sistema estructural.....	170
3.4.2.4 Análisis estructural.....	178
3.4.2.4.1 Construcción del modelo.....	178
3.4.2.4.2 Interpretación del modelo.....	187
a) Análisis modal.....	187
b) Espectro.....	195
c) Esfuerzos normales.....	195
d) Desplazamientos: deriva.....	196
e) Participación de la masa.....	196
3.4.2.5 Síntesis de la forma.....	204
3.5 CONCLUSIONES.....	205
3.6 RECOMENDACIONES.....	207
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	209



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Pedro Esteban Astudillo Sacoto en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA EN LA ESCUELA PAULISTA BRUTALISTA: ESTUDIO DE CASOS", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de Enero 2021



Pedro Esteban Astudillo Sacoto

C.I: 0105544027

Cláusula de Propiedad Intelectual

Pedro Esteban Astudillo Sacoto, autor/a del trabajo de titulación “ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA EN LA ESCUELA PAULISTA BRUTALISTA: ESTUDIO DE CASOS”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 27 de Enero 2021



Pedro Esteban Astudillo Sacoto

C.I: 0105544027



DEDICATORIA

Al Salva, Ana Lu y Ane.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Hernán García por su aporte para el desarrollo de este trabajo.

Del mismo modo a las personas e instituciones que contribuyeron con información que permitió dar forma a esta empresa:

Arq. André Augusto de Almeida Alves

Arq. Apoena Amaral

Arq. Izabel Amaral

Arq. Anália Maria Marinho de Carvalho Amorim

Arq. José Paulo Gouvêa

Arq. Danilo Hideki

Arq. Edmir Mantellatto

Arq. Paulo Mendes da Rocha

Arq. Tiago Oakley

Arq. César Shundi Iwamizu

Arq. Sheila Walbe Ornstein

Instituto de Pesquisas Tecnológicas



INTRODUCCIÓN

El área tecnológica a la cual pertenece este trabajo de titulación se caracteriza por la reflexión de las obras de la *Escuela Paulista Brutalista* a partir de su estructura, fundamentadas en el análisis histórico, arquitectónico, del sistema estructural y del desempeño de la estructura.

Sin embargo, si bien las obras analizadas han sido reconocidas por su forma, poco han sido profundizadas y entendidas a partir de su aspecto estructural, y más bien han sido abordadas desde un punto de vista puramente arquitectónico que considera aspectos simbólicos, culturales y ambientales, descartando el potencial de esta dimensión a partir de los fundamentos de la disciplina y el uso de programas computarizados.

En el contexto brasileño, investigaciones de la obra de Oscar Niemeyer perteneciente a la *Escuela Carioca*, han abordado la estructura a partir del aspecto histórico, arquitectónico, sistema estructural y análisis estructural que permiten entender a la estructura de una manera integral, y que ya incorporan herramientas digitales al análisis estructural. Como referencia para la realización del presente trabajo ha sido adoptada la tesis de maestría *O sistema estructural na obra de Oscar Niemeyer* (2010) de Leonardo da Silva Pirillo Inojosa, cuya metodología ha sido adoptada para los estudios de caso.

Sin embargo, en el contexto del *Brutalismo Paulista*, son pocos los trabajos que desarrollan un enfoque estructural de la obra arquitectónica, y estos corresponden a un análisis superficial, mas este análisis realiza el impacto de la estructura en el resultado final

de la forma, relación que será entendida a profundidad al ser parte de la identidad de esta escuela cuyas obras analizadas se sitúan en su década de mayor producción.

De este modo, existe un vacío de documentación desde el punto de vista académico de trabajos que empleen programas de análisis estructural para comprender y realizar una lectura íntegra del modo particular que Vilanova Artigas y Mendes da Rocha hacen e hicieron arquitectura y que se encuentra definida por la síntesis entre arquitectura-estructura, donde el aspecto tecnológico permitió materializar mediante formas plásticas esta relación.

El análisis crítico aquí planteado se fundamenta en una búsqueda que contribuye al entendimiento de la concepción del proyecto arquitectónico a partir del rol que juega la estructura a partir de la tipología y materialidad, así como en función del grado o nivel de conocimiento del diseño estructural del arquitecto para el planteamiento de la forma, razón por la cual, se introduce al lector en los dos primeros capítulos a una revisión histórica de estos aspectos que habilitarán la comprensión de cada uno de los enfoques que plantean los análisis de los estudios de caso que relacionan la arquitectura y la ingeniería.

La importancia del aspecto histórico como base del conocimiento de la obra arquitectónica, se presenta desde un principio en el documento. De modo que, el lector entienda la estructura a partir de la tipología, que muestra su dimensión organizativa y compositiva, y que invita a pensar a la estructura desde este lugar. Esta idea posteriormente se adopta en el abordaje crítico del sentido histórico y arquitectónico de los estudios de

caso. La decisión de culminar el tratamiento del tipo con el *Movimiento Moderno* obedece a aproximarlo a la *Escuela Paulista Brutalista* dada su estrecha relación, y partir del cual será posible evidenciar su aporte y potencial en la escena arquitectónica.

Así mismo, la aproximación a la estructura a partir de la materialidad, permite en el análisis del sistema estructural, someter a la obra a un análisis que permita determinar si la misma pertenece al orden de lo tectónico o estereotómico en función del sistema constructivo y la disposición de sus partes.

Conocer la relación entre arquitecto e ingeniero y cómo esta determina el desarrollo de la forma estructural, aporta como un elemento más a la discusión al análisis de la estructura. La indagación de las obras de Vilanova Artigas y Mendes da Rocha, expone su producción “brutalista”, como una fase en la que su pensamiento técnico ha evolucionado, hacia la manipulación de fuerzas al momento de proyectar arquitectura.

Esta importancia de la comprensión del comportamiento de una estructura, es abordada a través de la enseñanza de las estructuras para arquitectos, que introduce y justifica el último análisis llevado a cabo: el análisis estructural. Para ello, resulta necesario la exposición de los fundamentos del diseño estructural, imprescindibles para abordar este último análisis en pos de la determinación de la eficiencia de las formas a través del análisis modal y espectral utilizando el método de los elementos finitos.

De este modo, este documento presenta una reflexión de la forma estructural que sintetiza aspectos históricos, arquitectónicos, del sistema estructural y del análisis

estructural que exponen el potencial de la estructura en el diseño de obras arquitectónicas.

OBJETIVOS

Objetivo principal

Exponer al diseño estructural como aspecto fundamental en la generación de diseño en la obra arquitectónica

Objetivos específicos

Utilizar los modelos numéricos para representar los estudios de caso

Discutir la eficiencia de las formas al modificar los estados de carga en secciones críticas en los estudios de caso propuestos

Capítulo.1

La arquitectura y estructura

El origen de la arquitectura ha sido tema de interés desde mediados del siglo XVIII, a partir de la obra *De Architectura* del arquitecto italiano Marco Vitruvio Polión. En ella Vitruvio (1995) señala como origen a la “casa para habitar”. El origen de la vivienda según el arquitecto fue producto del descubrimiento del fuego que dio origen al intercambio social entre las personas, debido a que ni cuevas, ni bosques y árboles satisfacían la necesidad de un espacio cubierto.

Para Vitruvio, el origen de la arquitectura comenzó con edificaciones básicas, y fue producto de la experticia avanzada que permitió pasar de refugios a moradas. En relación a la lógica constructiva manifiesta que se “asientan árboles enteros en el suelo a la izquierda y derecha, dejando entre ellos un espacio para adaptarse a la longitud de los árboles, y entonces poner encima de estos, otro par de árboles, que descansan al final de los anteriores y en ángulo recto con ellos. Estos cuatro árboles delimitan el espacio de la vivienda. Luego, sobre estos, se colocan palos de madera, uno tras otro en los cuatro lados, cruzándose entre sí en los ángulos” (Vitruvio, 1995).

La construcción del primer refugio (Fig.1.1) es un símbolo que puede ser interpretado como una alegoría de la idea de Vitruvio en relación a la belleza arquitectónica intensificada por los órdenes de la arquitectura clásica (Kürelí, 2016).

Marc-Antoine Laugier—sacerdote jesuita y teórico de la arquitectura—, publica su libro *Essai sur l'architecture* (1753), en el que describe los principios generales de la arquitectura, sus elementos y órdenes.

En el primer capítulo cuenta la historia de un hombre

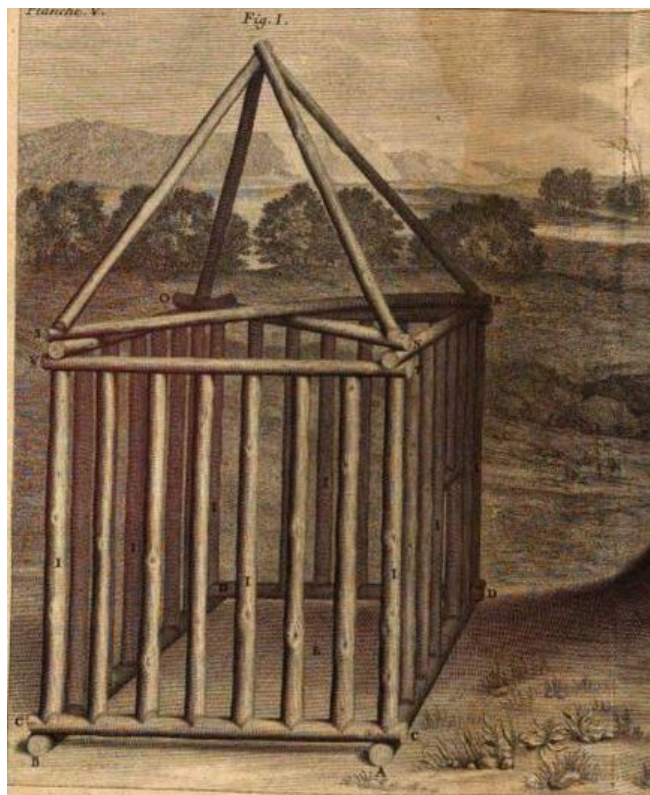


Figura 1.1. Ilustración de Claude Perrault del primer refugio según la descripción de Vitruvio

Fuente: Les dix livres d'architecture de Vitruve (1673). Recuperado de: https://archive.org/details/gri_33125008503100/page/n6

que, en búsqueda de un lugar duradero, encuentra cuatro ramas fuertes en el suelo, y las ata de tal manera que formen un cuadrado. Encima coloca cuatro piezas horizontales más y finalmente levanta la cubierta, conjunto al que denomina “cabaña primitiva” (Fig.1.2), y a la que considera como referencia de las siguientes obras arquitectónicas.

Para Laugier, la cabaña primitiva era producto del intelecto humano en supervivencia y consideraba como “perfecta” la imitación de la naturaleza. Es así



Figura 1.2. Ilustración de Marc-Antoine Laugier de su cabaña primitiva

Fuente: An Essay on Architecture (1755). Recuperado de: <https://archive.org/details/essayonarchitect00laugrich/page/n8>

que, la composición de las cuatro ramas simbolizaba la columna; las piezas horizontales encima los entablamentos; y el techo en la parte alta, el frontón.

Laugier (1755) asocia además la simplicidad de la edificación representada únicamente con elementos arquitectónicos-estructurales básicos con la noción de estética—pensamiento que acerca al arquitecto a una corriente racionalista. Otro arquitecto y teórico que destinó su tiempo a la búsqueda del origen de la arquitectura fue el arquitecto y paisajista británico Sir



Figura 1.3. Ilustración de Sir William Chambers de edificaciones primitivas de forma cónica y cúbica

Fuente: Primitive buildings of conical and cubic form (c.1757). Recuperado de: <https://www.rct.uk/collection/930311/primitive-buildings-of-conical-and-cubic-form>

William Chambers (1862), que en su libro *Un tratado sobre las piezas decorativas de la arquitectura civil* presenta variaciones a nivel formal de los refugios respecto a los dos anteriores. Aquí, la “cabaña primitiva” corresponde a una figura cónica cubierta de hojas o juncos (Fig.1.3). Una vez que los hombres descubrieron nuevos materiales y personalizaron la cabaña de acuerdo a sus necesidades, se dio paso a una forma cúbica (Fig.1.3).

1.1 APROXIMACIÓN A LA ESTRUCTURA DESDE LA TIPOLOGÍA

Uno de los aspectos más importantes de una estructura es su aporte a la expresión arquitectónica, y su influencia en el espacio arquitectónico. De este modo, las estructuras de las edificaciones son vistas como arquitectura, o como parte de la composición arquitectónica (Sandaker, 2008). A partir de una organización espacial se adopta una estrategia estructural, donde es necesario para un entendimiento más completo de la forma estructural, un criterio acerca de los propósitos de la estructura espacial, ya sean contextuales, prácticos, o en algunos casos, iconográficos (Unwin, 1997).

Según el arquitecto español Rafael Moneo, es necesario un retorno al concepto de tipo. Para Moneo, una obra de arquitectura puede ser vista como perteneciente a una clase de “objetos repetidos”. De esta manera para Moneo, el “tipo” puede ser definido como un concepto que describe un grupo de objetos caracterizados por la misma estructura formal, definida por la interacción de los elementos que lo constituyen. Reflexiona además que la idea de tipo—que considera la geometría abstracta—debe estar anclada también con la realidad, es decir, con el momento histórico en el que sucede (Moneo, 1978). La idea de “tipo” como concepto la comparte el arquitecto español Carlos Martí Arís, a lo que agrega que “engloba a una familia de objetos que poseen todos la misma condición esencial pero no se corresponde con ninguno de ellos en particular” (Martí Arís, 1993, p. 16).

Jacoby (2013) considera a la tipología, como el estudio de los tipos y el análisis de sus características, donde

el tipo, describe a un grupo, clase o categoría con ciertas características similares, de acuerdo a su uso o morfología.

El tipo, es un elemento básico de organización espacial, que ha sido presentado en diferentes momentos de la historia, y su estudio requiere una redefinición de cada generación, de la esencia de la arquitectura y una explicación de los problemas que atiende (Moneo, 1978).

Las teorías del tipo en torno a la arquitectura, se refieren a una síntesis racional de la forma, debido a su organización conceptual y diagramática. La abstracción diagramática se convirtió en instrumento de la teoría e historia de la arquitectura en el siglo XVIII, anterior al discurso moderno consolidado en la década de 1990. El crítico de la arquitectura Jeffrey Kipnis, sugiere que la tipología no existe sin los diagramas gráficos al expresar que: “los diagramas aseguran las teorías tipológicas, evidenciadas por ejemplo en los catálogos de Durand” (Kipnis, 2006). De esta manera el diagrama arquitectónico puede ser definido como un diagrama tipológico específico a disciplina de la arquitectura y a su producción de conocimiento (Jacoby, 2015).

La revisión histórica aquí presentada, transita distintos enfoques que exponen el papel de la estructura en la arquitectura, comenzando por el estudio taxonómico de Le Roy, pasando por desarrollo del tipo como diagrama de Durand que influenciaría al *Movimiento Moderno* con el que el tipo se convirtió en prototipo estructural. Así, los diferentes autores, exponen a la estructura—mediante elementos arquitectónicos—como determinante en la organización del espacio.

1.1.1 Julien-David Le Roy: el tipo como clasificación

Aunque la clasificación tipológica en la arquitectura, fue anticipada por el arquitecto francés Augustin-Charles d'Aviler en el siglo XVII, no fue sino hasta el siglo siguiente con el arquitecto y arqueólogo francés Julien-David Le Roy que se convirtió en instrumento (Jacoby, 2015).

Para Le Roy los diagramas arquitectónicos se basan en la producción tipológica, y además sostenía que la función del diagrama dependía de la abstracción. Esta abstracción debía considerar la historia, el contexto y la cultura. Así, el diagrama tipológico considera a la arquitectura como un “objeto específico” y como “posibilidad genérica de objetos”. De acuerdo a Le Roy, el diagrama limita las posibilidades de la especulación en la disciplina sin determinar una representación formal finita. Al abstraer los diagramas organizativos y estructurales de distintos ejemplos de arquitectura, el tipo puede ser analizado y proyectado como sería anticipado por Jean-Nicolas-Louis Durand (Jacoby, 2015).

Le Roy en su *Lámina 1* (Fig.1.4) de su obra *Las Ruinas de los Más Bellos Monumentos de la Antigua Grecia* (1758), constituye uno de los primeros estudios de la arquitectura a través del tipo, donde indica la evolución de la arquitectura desde una simple cabaña. Para el arquitecto mexicano Claudio Nieto (Projective Cities, 2015), la *Lámina 1* debería ser considerada como un estudio desde una perspectiva de “géneros”, es decir, identificar los asuntos tipológicos de cada tipo que contribuyeron a la sofisticación general del templo.

Desde los inicios de la civilización, el templo ha sido la representación arquitectónica de la concepción de divinidad de la sociedad. Varios de los mayores logros de construcción se han logrado a través de estos edificios. En la *Lámina 1*, Le Roy plantea el desarrollo cronológico de los templos como la manera más adecuada para captar la evolución de estos edificios. Mientras más público es el edificio, mayor es su grado de complejidad, así, el carácter del templo es expresado a través de la estructura. Esta lámina ilustra la evolución histórica de la arquitectura sagrada, ordenada en tres líneas de desarrollo: fenicios, egipcios y hebreos, griegos y romanos, y cristianos.

En este documento se aprecian distintos puntos de partida o ideas según la cultura como, por ejemplo: los egipcios se caracterizan por el uso de paralelogramos divididos en su interior, los griegos a partir de pequeñas cabañas de madera y los templos cristianos surgen con las catacumbas. Con el correr del tiempo, cada cultura desarrollaría su propia idea a escala y detalle (Kisacky, 2001).

Aquí, Le Roy, explica el desarrollo tipológico y transformación de un grupo formal de edificios, y transmite mediante gráficos la complejidad de su estructura a través de diagramas organizativos y estructurales comunes (Projective Cities, 2015). A continuación, se expresa la arquitectura religiosa de las líneas de desarrollo antes mencionadas, basadas en el texto *Ensayo sobre la Historia de la Arquitectura* (1770), de Julien-David Le Roy.

1.1.1.1 Templos egipcios, hebreos y fenicios

Los primeros constructores egipcios utilizaron canteras

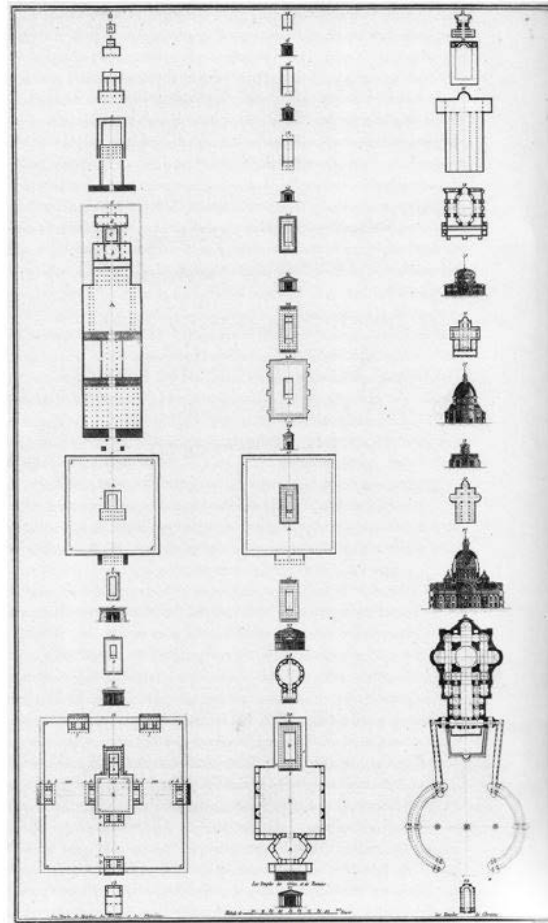


Figura 1.4. Ilustración de Julien-David Le Roy de la *Lámina 1* de *Las Ruinas de los Más Bellos Monumentos de la Antigua Grecia*

Fuente: *Les Ruines des plus beaux monuments de la Grèce* (1758). Recuperado de: https://archive.org/details/gri_33125009324597/page/n6

de piedras para la construcción de templos y pirámides. A causa de la baja resistencia a la tracción de la piedra y su variabilidad (debido a una multitud de grietas y huecos internos), la luz que cubría la viga debía ser pequeña, evitando así fallas por flexión. Debido a que la configuración poste-dintel utilizado tenía

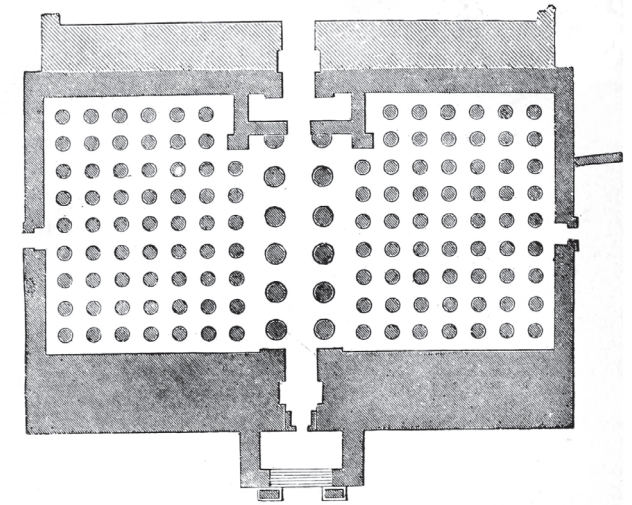


Figura 1.5. Diagrama de planta y representación artística del Gran Salón Hipóstilo de Karnak en Egipto

Fuente: *History of architecture in all countries, from the earliest times to the present day* (1897). Recuperado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Great_Hypostyle_Hall_of_Karnak

una capacidad limitada para cargas horizontales o excéntricas, la altura de los edificios era relativamente baja, para lograr estabilidad las columnas tenían que ser gruesas para evitar el colapso. A este sistema se lo conoce como hipóstilo, y permite la construcción de espacios continuos de grandes dimensiones en planta

(Fig.1.5), y en el caso de requerir luz, se perforaba el plano superior (Leet & Uang, 2005).

Las ideas más sencillas que caracterizaron a la arquitectura egipcia en sus inicios, se pueden observar en las primeras ruinas. De acuerdo al historiador griego Diodoro Sículo, las primeras cabañas de los egipcios estaban formadas por cañas y juncos entretejidos (Fig.1.6).

El más simple de los edificios egipcios, corresponde a las ruinas todavía visibles de un Templo-Observatorio en Asuán. Consta de un porche adornado con una fila de columnas.

Existían dos cámaras posteriores, una para los sacerdotes y la otra para el altar (Fig. 1.6). Por aquel entonces, los arquitectos más destacados de Egipto, transformaron la planta de este templo en una disposición encontrada en Esna en el Templo de Khnum, compuesto por un porche de dos filas de columnas y a su interior presenta más divisiones que su predecesor (Fig.1.6).

Tanto estos dos templos, como la cabaña de la cual eran imitaciones, eran autoportantes. Entonces los egipcios construyeron templos basados en el modelo de una cabaña refinada y alargada precedida por un patio. Así el Templo de Horus en Edfu, refleja esta configuración con el porche que conduce al interior adornado con cuatro filas de columnas y precedido por patio de tamaño considerable (Fig.1.6).

El siguiente modelo de templos fue construido en un modelo de mayor escala, que se observa en las ruinas del Templo de Luxor. Al edificio se accedía a través de

un vestíbulo de grandes dimensiones, aquí el techo estaba soportado por un bosque de columnas.

A continuación, se estructura un peristilo, a través del cual se transita antes de ingresar a un patio abierto, configurado por una doble columnata a cada lado y un pórtico de frente. Este pórtico tenía una profundidad de cuatro filas de columnas. Las columnas continuaban en los cuartos que precedían hasta llegar a la parte más oculta y secreta del edificio donde permanecía la estatua de dios (Fig.1.7).

Los egipcios continuaron construyendo templos, aunque diferentes a los dos últimos templos descritos. El Templo de la Serpiente Knupis (Fig. 1.8) se estructura por un espacio central cerrado, y por un muro perimetral que ha sido “perforado” de manera que destacan elementos sólidos en forma de “L” en cada esquina y una serie de columnas conforman los lados longitudinales y tanto en la fachada frontal como en la posterior el espacio también es liberado a través del uso de columnas.

Aparentemente en el período del faraón Sesostris, éste ordenó la construcción del Templo Bubastis, en honor a la diosa de quien la ciudad tomó su nombre. Este templo es una reconstrucción de Le Roy de acuerdo a relatos del historiador griego Heródoto. Se compone de un naos o cella—cámara interior de un templo—, similar al Templo-Observatorio y al Templo Khnum.

El templo está rodeado por un muro de piedra tallada, en torno a la cual se establece un peristilo, y el ingreso al templo, se realiza a través de un porche de tres filas de columnas (Fig.1.7).

La disposición del Templo de Bubastis reaparece en el edificio más antiguo construido por los hebreos: El Tabernáculo. Constaba de un naos que era independiente, y que se alejaba un poco de su muro perimetral. Los lados más extensos, estaban alineados con veinte columnas, y los más cortos con diez (Fig.1.8).

El Templo de Salomón era otro guardaba una analogía con el de Bubastis. El cuerpo principal del templo era un naos, que estaba rodeado de un patio rectangular y daba frente a una gran patio. Tanto el naos como estos dos patios eran independientes y están en el centro de un tercer patio de enormes dimensiones (Fig.1.8)

En relación al Templo Fenicio, Le Roy, sugiere que el contacto entre hebreos y egipcios con los fenicios influyó en la forma de sus templos y toma como ejemplo las ruinas de un pequeño templo en Fenicia, cuya disposición es similar a aquellos encontrados en Egipto y Palestina (Fig.1.8).

1.1.1.2 Templos griegos y romanos

Los templos griegos consistían en un santuario rodeado de columnas que articulaban el espacio exterior. Las articulaciones de los órdenes denotan el perfeccionamiento de su arquitectura a lo largo de varios siglos. Estos se componían por estilobatos, bases, capiteles, arquivoltas, frisos, cornisas y frontones, que expresaban metafóricamente la naturaleza y al mismo tiempo representaban un propósito estructural específico (Carter, Kirkegaard & Tyrell, 2013).

La disposición de columnas en torno a los templos griegos ha dado origen a varias configuraciones como las siguientes. Próstilo: templo con un pórtico frontal.

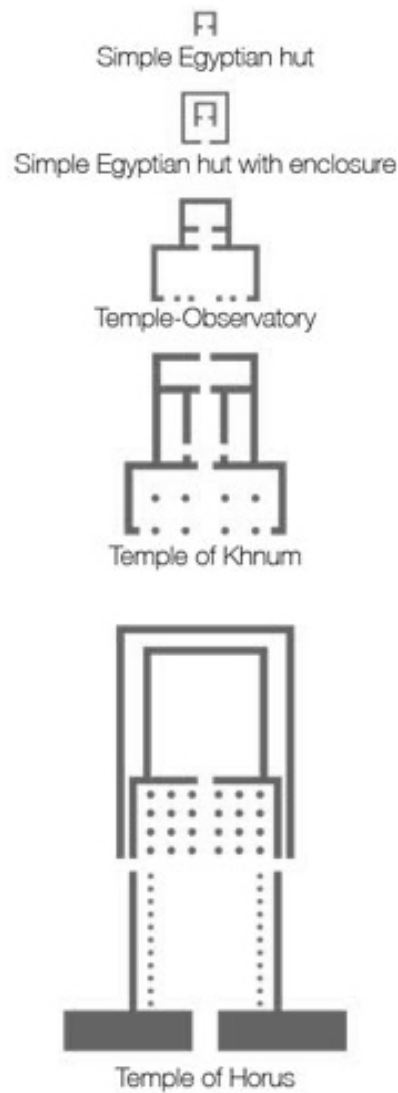


Figura 1.6. Ilustración de Claudio Nieto. De arriba hacia abajo: cabaña egipcia simple, cabaña egipcia sencilla cerrada, Templo-Observatorio, Templo de Khnum y Templo de Horus

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

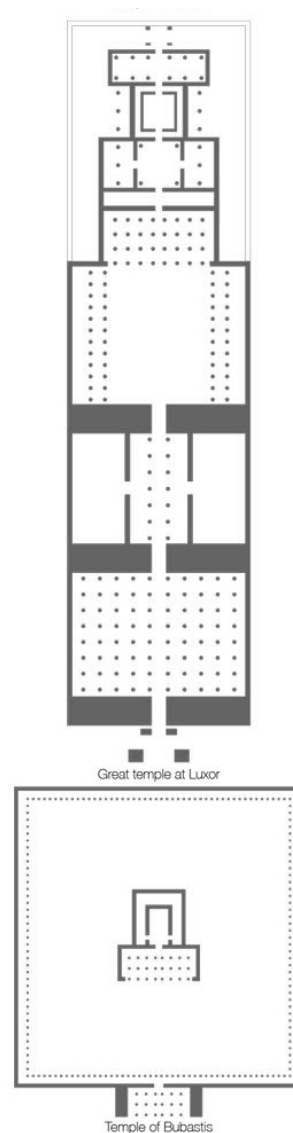


Figura 1.7. Ilustración de Claudio Nieto. De arriba hacia abajo: Gran Templo de Luxor y Templo de Bubastis

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

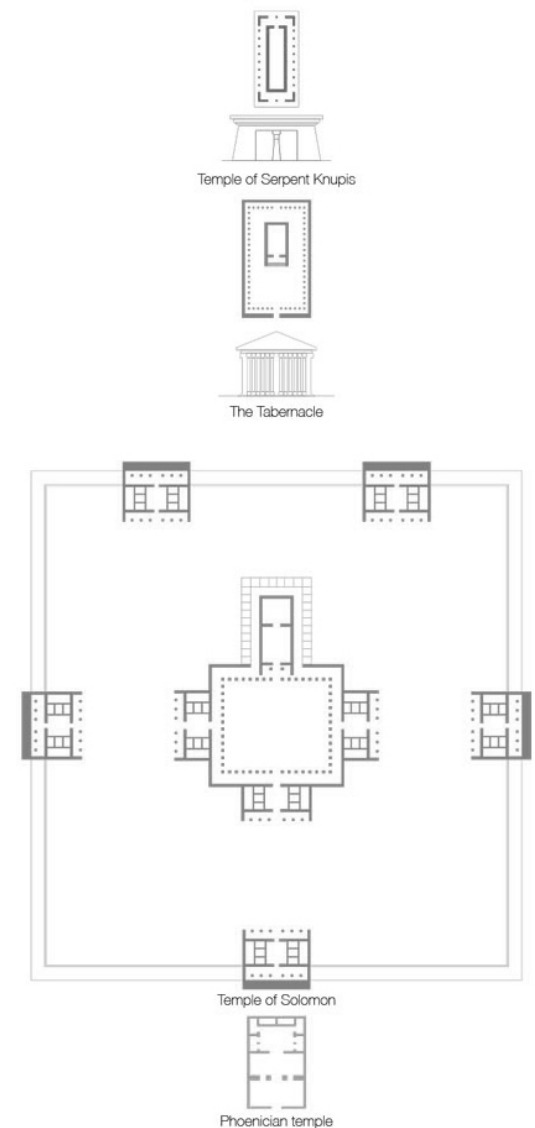


Figura 1.8. Ilustración de Claudio Nieto. De arriba hacia abajo: Templo de la Serpiente Knupis, El Tabernáculo, Templo de Salomón y Templo Fenicio

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>



Anfipróstilo: con pórticos en la parte frontal y posterior. Períptero; pórticos conectados por columnatas abiertas a lo largo de sus lados. Díptero: con pórticos conectados por una doble fila de columnas a lo largo de sus lados. En planta se aprecia como los pilares de los templos griegos se alinean a lo largo del borde del estilóbato, al cual se accede por todos los lados, y en el centro se sitúa el cella. En el caso del templo períptero (Fig.1.9), en la parte frontal y posterior de la cella, permanece una segunda línea de columnas, así como al interior del templo se disponen en línea las columnas (Leupen, Grafe, Koernig, Lampe & de Zeeuw, 1997).

El templo griego puede decirse ha sido estructurado en función de un sistema de líneas imaginarias o ejes que regulan el posicionamiento de columnas, donde un eje a lo largo del templo regula la simetría.

Para Leupen et al. (1997), en el templo griego la relación entre forma construida y transferencia de fuerzas resulta complicada. En el diseño de los templos griegos, la resistencia de materiales jugaba un papel secundario ante las propiedades formales y ópticas del mismo. Por ejemplo, en el caso del mármol—del cual estaba contruidos los templos—, apenas es capaz de absorber los momentos de flexión, de manera que el uso del arquitrabe que cubría la distancia entre columnas, no es una solución lógica en relación a la mecánica del material. Sin embargo, el exceso de peso y la ubicación de varios soportes en pequeños intervalos, limita el ancho del arquitrabe, permaneciendo el esfuerzo a tensión al mínimo.

Los griegos pasaron por varias etapas que comenzaron con simples cabañas contruidas previo al conocimiento de los egipcios. Eran cabañas anchas, en las que el cielo

raso de madera requería como soporte travesaños, traducido en troncos de madera, que sugerirían la idea de columna (Fig.1.9).

Para llegar al refinamiento que presentan sus mejores templos, los griegos idearon, un sistema regular basado en los órdenes, a diferencia de los egipcios que al parecer no siguieron ningún sistema. Por esta razón se reconoce a los griegos como los inventores del “arte de construir”, más allá de haber tomado algunas ideas de los egipcios.

Cuando los primeros templos griegos quedaron demasiado pequeños para las multitudes que llegaban para los sacrificios, los arquitectos previeron construirlos más grandes. Una extensión excesiva de las vigas del techo ocasionaría su deformación, o talvez la percibirían, una vez construido. Como solución cortaron troncos de árboles y los colocaron en posición vertical en intervalos iguales, debajo de una viga que se extendía a lo largo del templo, de modo que soportara las vigas transversales del techo, y aliviara la estructura. Esta disposición de las columnas se observa en el Templo in Antis y el Templo Anfipróstilo (Fig.1.9).

Los inventores del peristilo captaron la novedad producida por columnas en intervalos iguales y pronto construirían otros templos a lo largo de elevaciones externas como el Templo Períptero y el Templo Díptero (Fig.1.9). Eventualmente se agregarían pórticos de columnas más grandes al exterior y al interior de los monumentos como el Templo de Jupiter Olímpico (Fig.1.9).

En este último templo, la proporción del naos se basó

en los templos griegos donde el largo era más del doble que el ancho. El templo está centrado en un gran patio que lo encerraba y alrededor del cual se estructuró una galería de columnas. El acceso al recinto era a través de un porche estructurado por dos filas de columnas.

Mientras los romanos permanecieron paganos, nunca partieron de las formas rectangulares y circulares de los templos inventadas por los griegos. Cuando adoptaron la cristiandad, fueron los arquitectos griegos quienes les enseñaron a combinar estas dos formas, al suspenderlos como si fueran templos circulares sobre los vastos arcos de sus naves.

Así, el primer ejemplo de arquitectura romana que desarrolla Le Roy, corresponde al Templo Díptero Romano (Fig.1.10), de similares características al templo díptero construido por los griegos, del que se diferencia por la ausencia del opistódomo en el templo romano.

Aunque la arquitectura romana reproduce muchas de las formas ya presentes en Grecia, la originalidad de esta cultura radica en la combinación de estos elementos. Por ejemplo, la combinación de pilares con arcos—elementos que tienen su origen en principios estructurales distintos—se lleva a cabo por razones formales, que abren el abanico de posibles combinaciones.

A los romanos también se les atribuye el desarrollo de un método para cerrar el espacio interior con una cúpula de mampostería, teniendo al Panteón de Roma como caso paradigmático, en donde la idea de una forma se apoya en la técnica constructiva. En él se observan principios de la construcción en piedra desarrollado por

los romanos, y su empleo característico de bóvedas y cúpulas.

Su estructura principal es de planta circular coronada por una cúpula de aproximadamente 43 metros de diámetro. El centro de la cúpula tiene una abertura, lo que demuestra que los romanos sabían que el centro de la cúpula no estaba bajo carga. Esta solución estructural determina la gran amplitud de esta sala circular. A la estructura principal le antecede el pórtico rectangular de acceso—conformado por ocho columnas de grandes dimensiones—que oculta la planta circular (Fig.1.10).

La cúpula—consecuencia de avances en la técnica—permitió cubrir amplias dimensiones en piedra y concreto sin la necesidad de apoyos, donde su esfuerzo a la flexión era mínimo. Considerando que la piedra trabajaba a compresión, la distancia que cubría, se obtenía aplicando el principio del arco. Así, con el uso de esta forma, no existe más distinción entre soporte (pilar) y carga (arquitrabe) propia los templos griegos, de manera que el Panteón, viga y soporte es un mismo elemento. En este caso cuando los integran los elementos de tracción y compresión se trata de una “estructura integrada” (Marquardt, 2005).

Finalmente, en el caso del Templo de Baco, se compone de un naos—similar al Templo Romano Díptero—, que da frente a un patio cuadrangular. El acceso principal del recinto es a través de un pórtico de ocho columnas, que se conecta a un vestíbulo hexagonal que desemboca en un patio rectangular que da frente al naos. En los dos lados del patio que conducen hacia el naos se configura una columnata y se erigen dos exedras (Fig.1.10).

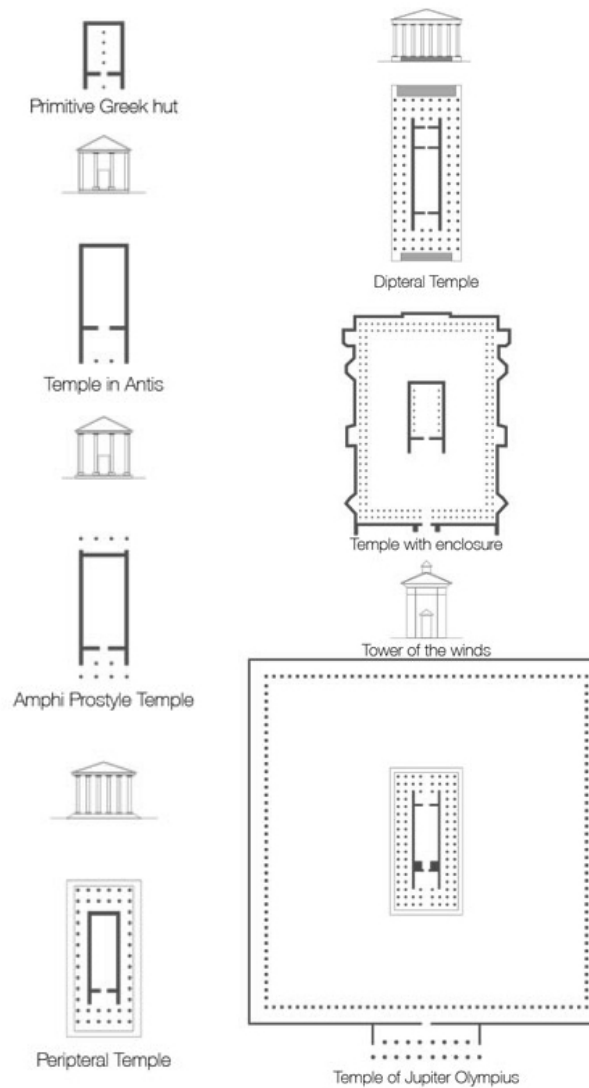


Figura 1.9. Ilustración de Claudio Nieto de templos griegos. De arriba hacia abajo, de izquierda a derecha: cabaña primitiva griega, Templo in antis, Templo Anfipróstilo, Templo Períptero, Templo Díptero, Templo con cerramiento, Torre de los Vientos y Templo de Jupiter Olímpico

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

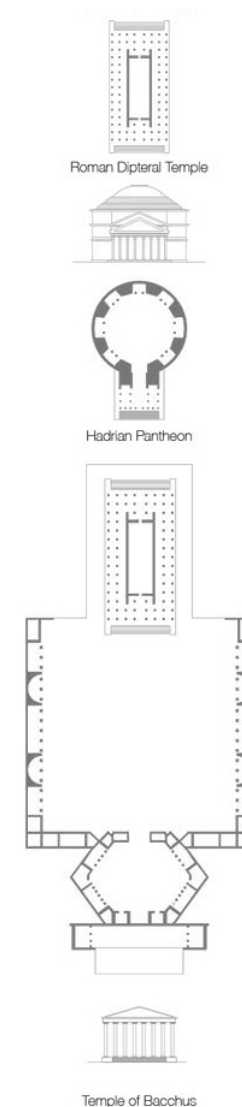


Figura 1.10. Ilustración de Claudio Nieto. De arriba hacia abajo: Templo Díptero Romano, Panteón de Agripa y Templo de Baco

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

1.1.1.3 Templos cristianos

La propagación de las distintas religiones, el celo con el que los monarcas y el pueblo las adoptaron y la resistencia que encontraron, parece haber sido causas principales de la diferencia en la capacidad interna entre edificios sagrados para el “verdadero dios” y templos dedicados a deidades paganas. En este contexto, la religión cristiana fue perseguida desde un principio, y los primeros cristianos se ocultaron bajo tierra, para celebrar su religión en secreto en catacumbas (Fig.1.11).

Posteriormente aparece la Antigua Basílica de San Pedro—primer templo cristiano—, construido por orden de Constantino I. Su diseño fue parcialmente copiado de antiguas basílicas, y su planta tomó la forma aproximada de una cruz (Fig.1.11).

La Basílica de Santa Sofía, estuvo a cargo de los arquitectos Antemio de Trales e Isidoro de Mileto. Tiene una disposición similar a la Antigua Basílica de San Pedro, y se caracteriza por la invención de una inmensa cúpula que se levanta en el centro de una cruz, y su planta circular está apoyada en pechinas (Fig.1.11).

En la Basílica de San Marcos, la disposición se asemeja a la griega, pero su planta está basada en una forma de cruz más regular que las que habían sido antes utilizadas. Las bóvedas sobre el centro, y las alas de la cruz esta soportadas por pechinas y atravesadas por cúpulas más altas que las que antiguas (Fig.1.12).

La Catedral de Santa María del Fiore (Fig.1.12) se sitúa en la Edad Media, época en la que la “estructura

integrada” alcanza su pico máximo con las catedrales góticas. El objetivo en este período fue el de la construcción “lo más alta y ligera posible” logrados a través de formas que respondan satisfactoriamente el juego de fuerzas en la estructura (Marquardt, 2005).

A raíz de la elección del papa Julio II a inicios del siglo XVI, Donato Bramante resultó ganador del concurso para la construcción de la Basílica de San Pedro. El interior de su diseño en cruz latina se concibió de gran manera, la nave principal proporcionada y los adornos que marcaban los extremos de las otras tres alas, que consistían en peristilos de columnas separados flanqueados en pilares sólidos (Fig.1.12).

La instancia más temprana en el perfeccionamiento del diseño de iglesias abovedadas corresponde a la Capilla de Versailles (Fig.1.12). En su parte inferior el arquitecto francés Jules Hardouin-Mansart, mantuvo la pesada decoración de los arcos, y en la parte superior desplegó la arquitectura griega. Al interior hizo uso del peristilo, donde las columnas sostienen el empuje de las bóvedas y el peso del techo que lo cubre.

Para Le Roy, los tres desarrollos formales y progresivos se sintetizan en: la planta en forma de cruz, las filas paralelas de columnas independientes en la basílica y la cúpula; presentes en el Panteón de París construido entre 1757 y 1790 (Fig.1.13).

1.1.2 Jean-Nicolas-Louis Durand: el tipo como diagrama

Una nueva fase en la formalización de la arquitectura, se inicia en la primera década del siglo XIX, con el arquitecto y teórico francés Jean-Nicolas-Louis

Durand. Su trabajo no correspondía tanto a la teoría de la arquitectura, sino más bien, a un método de diseño para estudiantes quienes debían familiarizarse con la arquitectura civil. Ésta probablemente es la principal razón de haber reducido su idea de arquitectura a lo elemental, donde las formas no se refieren a un uso específico o programa (Szambien, 1982). Durand concibe una arquitectura que da prioridad a las partes sobre el todo, distanciándose así de la práctica arquitectónica que obedecía a la aplicación de modelos que se venía practicando hasta ese momento. Este enfoque en el que se opone a un modelo totalitario de concebir arquitectura, le vale la denominación de atomista por parte de autores como Martí Arís; esto en referencia al trabajo de Durand, en el que pretende encontrar la configuración de la totalidad de la obra a través del estudio de los elementos—independientes del todo (Nehme, 2011).

Para Durand el principal objetivo de la arquitectura no consiste más en la imitación de la naturaleza sino en la composición o “disposición” mediante la suma o estructuración de las partes. Los criterios más relevantes en la composición de Durand son la conveniencia y economía. La conveniencia hace referencia al funcionalismo, a lo que es apropiado para una función; mientras que la economía requiere de simetría, regularidad y simplicidad—mediante en el uso de cuadrículas y figuras geométricas simples. Para ello Durand emplea una serie de herramientas derivadas de la geometría euclidiana como la cuadrícula de puntos y líneas axiales. De acuerdo a Durand, el ejercicio del arquitecto es combinar elementos arquitectónicos—columnas, pilares, bóvedas, entre otros—, para generar entidades más complejas, cuyas partes serán posteriormente articuladas en un edificio (Moneo, 1978).

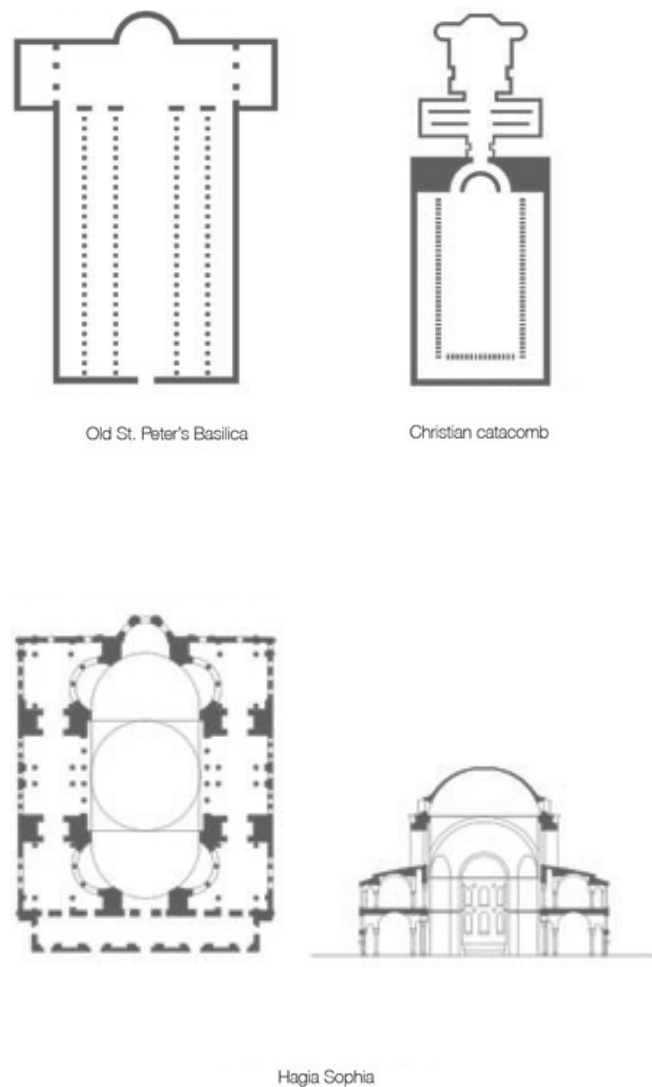


Figura 1.11. Ilustración de Claudio Nieto. De arriba hacia abajo, de izquierda a derecha: Antigua Basílica de San Pedro, Catacumbas cristianas y Basílica de Santa Sofía

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

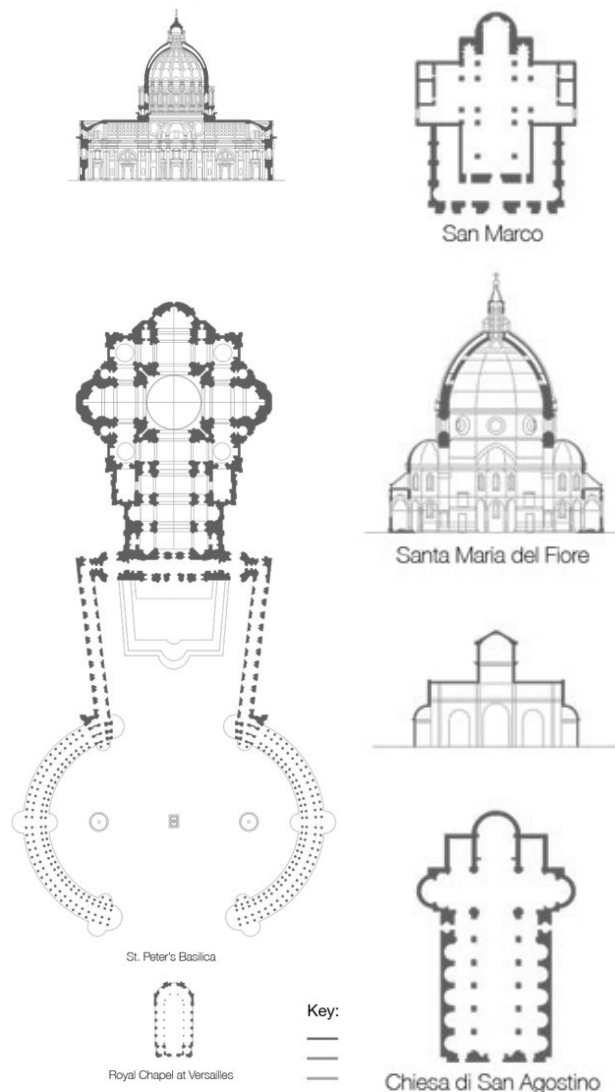


Figura 1.12. Ilustración de Claudio Nieto de templos griegos. De izquierda a derecha, de arriba hacia abajo: Basílica de San Pedro, Capilla de Versalles, Iglesia de San Marcos, Catedral de Santa María del Fiore y Basílica de Sant'Agostino

Fuente: Projective Cities Architectural Association Postgraduate Programme (2015). Modificado en base a: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

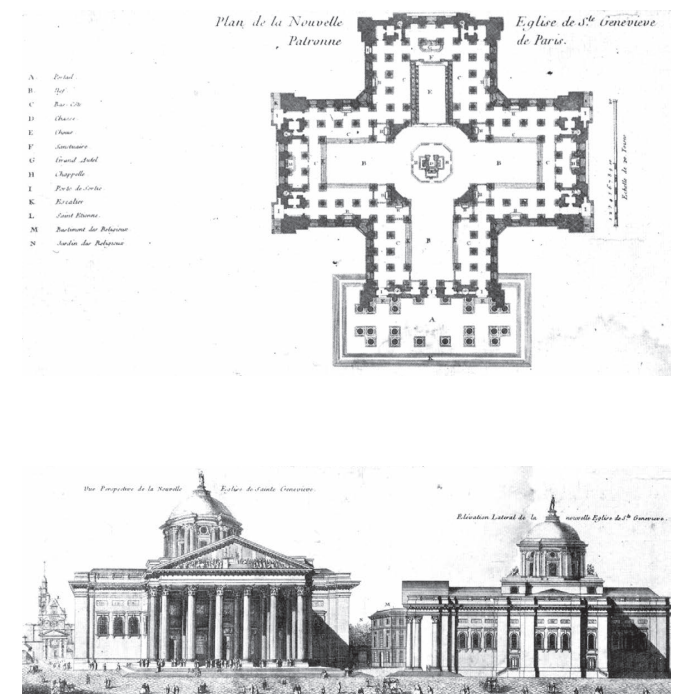


Figura 1.13. Primer proyecto de Jacques-Germain Soufflot para el Panteón de París

Fuente: Soufflot et l'architecture des Lumières (1980). Recuperado de: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Panth%C3%A9on_\(Paris\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Panth%C3%A9on_(Paris))

El concepto de tipo de Durand corresponde a una forma geométrica simple, de la cual se pueden derivar formas más elaboradas, concepto que representa los principios de la arquitectura que Durand perseguía. Según Durand, el establecimiento de elementos básicos de la arquitectura, permitía determinar los principios fundamentales de la arquitectura. Estos elementos se encontraban en todo edificio independientemente de su estilo o época, y entre los más sencillos se encuentran muros, columnas y los elementos a los que soportan, como losas, techos y bóvedas, y los detalla en su lámina *Elements des Edifices* (Fig.1.14) en su obra *Recueil et Parallèle des edifices en tout genre, anciens et modernes* (1801).

Luego de haber expresado distintos elementos arquitectónicos en su primera obra, en la última lámina de su libro *Précis des leçons d'architecture données à l'École Polytechnique*, Durand explica paso a paso el procedimiento de composición de un proyecto. Este proceso consta de seis etapas. En la primera etapa, se colocan los ejes principales de la composición. En la segunda etapa, se ubica una segunda cuadrícula de ejes secundarios complementarios. Luego se disponen los muros a lo largo de los ejes, y las columnas son colocadas dentro de las áreas delimitadas por las paredes. De esta manera, los puntos y líneas del esquema son reemplazados por representaciones de elementos arquitectónicos (Durand, 2000).

En la quinta etapa se dibujan los demás elementos arquitectónicos, y en la etapa final un corte y elevación son generados a partir de la planta (Fig.1.15). Gracias a la homogeneidad que produce la trama basada en una cuadrícula, se alcanza la igualdad de medidas, definida por la colocación de columnas a una misma distancia,

y, así pues, un igual reparto de cargas (Moneo, 1981).

Durand en su tercer obra, *Partie graphique des cours d'architecture faits a l'École Royale Polytechnique depuis sa réorganisation* (1821), plantea una cuadrícula—de un alto grado de abstracción—, que se caracteriza por la repetición de un limitado número de elementos básicos y la uniformidad de espesores de pared y columnas aún no especificadas (Fig.1.16). Así, aparentemente esta cuadrícula priva a la arquitectura de su tradicional significado simbólico, de la que los órdenes habían sido fundamentales. La razón por la que los órdenes aparecen de manera vaga en las plantas esquemáticas, responde a una fase donde todavía no está determinado el diseño. Durand a través de este método, demuestra el carácter esencial y vigencia de los órdenes, a pesar de que el módulo—mediante sus proporciones—dejaría de ser el centro del diseño, aunque manteniendo su función como articulador de la cuadrícula (Goudeau, 2015).

La relación entre edificios y figuras geométricas, están también presentes en su tercer obra en la lámina *Ensembles d'édifices formés par la combinaison de parties de cinq entr'-axes de largeur* de 1821 (Fig.1.17). Aquí son dibujados esquemas geométricos en el centro de la ilustración. Dos edificios son presentados en planta, sección y elevación. Esta lámina describe el proceso para llegar a la forma arquitectónica partiendo de un esquema geométrico. Se comienza representando el esquema compuesto de cinco puntos, uno en cada una de las esquinas y uno en el centro. Las esquinas son conectadas por líneas. Le siguen dos esquemas abstractos progresivos hacia la planta arquitectónica; en el segundo de ellos, se ubican elementos estructurales como columnas. Este

método de composición se diferencia de los anteriores planteados por Durand, debido a que el proceso da como resultado dos plantas arquitectónicas (Madrazo, 1994).

Para el historiador suizo Werner Oechslin, Durand muestra a través de su obra, cómo la arquitectura podría empezar a ordenarse en relación a la historia y destaca su potencial para dar respuesta a las condiciones actuales cada vez más complejas (Oechslin, 1986). El trabajo de Durand, a raíz de sus combinaciones de tipos, contribuyó en la formación de una arquitectura más autónoma que la anclada a la tradición, influenciando de particular manera a la arquitectura moderna que se desarrolló hacia el racionalismo y funcionalismo.

1.1.3 Movimiento Moderno: el tipo como prototipo

1.1.3.1 Charles-Édouard Jeanneret-Gris (Le Corbusier)

El arquitecto alemán Hermann Muthesius, fue uno de los pioneros del Movimiento Moderno en expresar su interés en el tipo. En una ponencia resalta la incidencia del tipo en la arquitectura y en las normativas de la producción industrial (Frampton, 1992). Argumentaba que, el concepto de tipo debía ser revisado, a raíz de los avances tecnológicos, como son la producción en masa y la estandarización (Meninato, 2015).

El Modernismo, del cual el arquitecto suizo Le Corbusier participa, acoge el método diagramático de Durand, en razón de su economía de tiempo y recursos y facilidad para comunicar. Le Corbusier comparte con Durand la convicción de que una metodología de diseño viable

debería usar geometría pura, que organice y distribuya mediante ejes o líneas reguladoras (Vidler, 2000). Al ser el problema del programa potencialmente resuelto por el diagrama, Le Corbusier expresaría que “la verdad reside en los diagramas” (Le Corbusier, 1933).

El tipo que en su sentido primario y original que permitía la reproducción exacta de un modelo pasaría de una abstracción a la realidad en la arquitectura. En virtud de la industria el tipo se había convertido en prototipo. Para Le Corbusier el tipo regula al edificio como un ‘sistema de funciones’, con funciones definidas como dinámicas, donde no existe relación con la estructura y organización espacial. Sin embargo, sería esta separación entre función y estructura—contradiendo el axioma *forma-sigue-función* del Modernismo declarado por Louis Sullivan—, la que permitió al arquitecto desarrollar el concepto de planta libre, poniendo a prueba los límites de las tipologías tradicionales basadas en “géneros” que autores como Le Roy habían instrumentalizado (Jacoby & Lee, 2007).

Le Corbusier se interesó en la condición de un prototipo industrial que permitía una repetición ilimitada, dejando de lado el trabajo artesanal. El arquitecto expresaría respecto a este prototipo lo siguiente:

“Estructuras monolíticas de hormigón armado lisas sin muros. Separación de funciones sobre cimentación de 6 pilares. Permitido por el género de su cálculo de resistencia, en la construcción no importa en qué punto se encuentran los paramentos de fachada o del interior ...” (citado en Corres Álvarez. 2002: 5).

La cuadrícula como elemento esencial organiza la

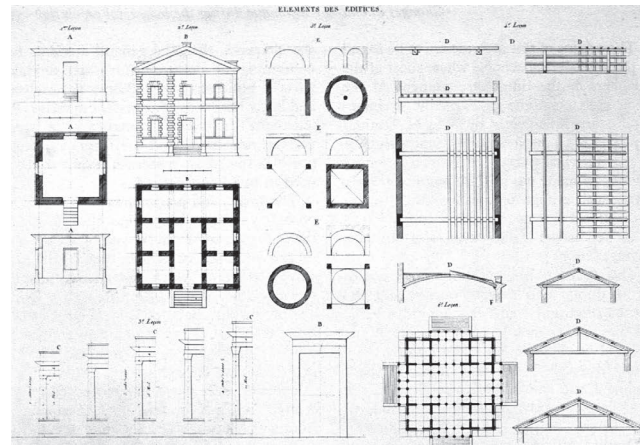


Figura 1.14. Ilustración de Jean-Nicolas-Louis Durand (1801). *Elementos de los edificios*

Fuente: Précis of the Lectures on Architecture (2000). Recuperado de: <https://www.getty.edu/publications/virtuallibrary/0892365803.html>

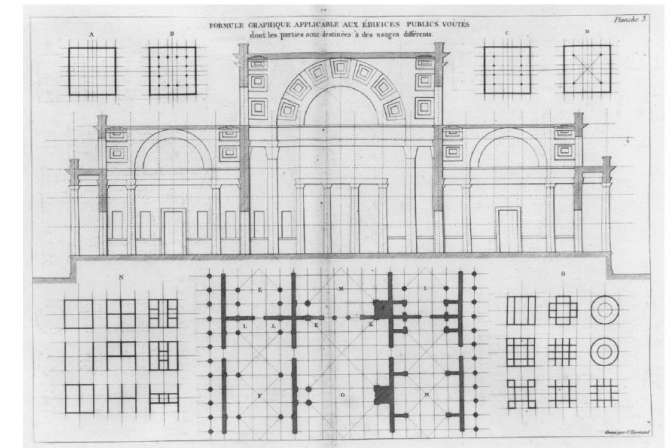


Figura 1.16. Ilustración de Jean-Nicolas-Louis Durand (1821). *Fórmula aplicable a edificios públicos abovedados*

Fuente: Précis of the Lectures on Architecture (2000). Recuperado de: <https://www.getty.edu/publications/virtuallibrary/0892365803.html>

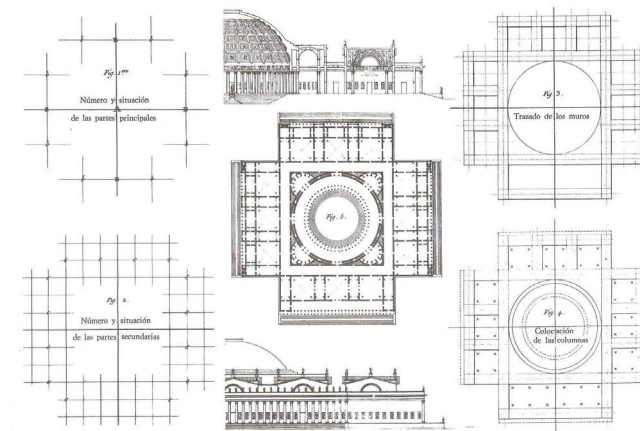


Figura 1.15. Ilustración de Jean-Nicolas-Louis Durand (1802-1805). *Procedimiento en la composición de un proyecto cualquiera*

Fuente: FAMagazine. Ricerche e progetti sull'architettura e la città (2017). Recuperado de: <http://www.famagazine.it/index.php/famagazine/article/view-File/34/104>

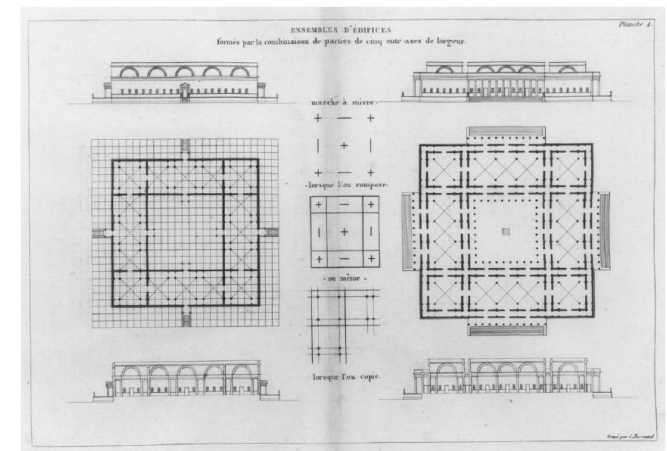


Figura 1.17. Ilustración de Jean-Nicolas-Louis Durand (1821). *Conjuntos de edificios formados por la combinación de partes de cinco ejes intermedios*

Fuente: Précis of the Lectures on Architecture (2000). Recuperado de: <https://www.getty.edu/publications/virtuallibrary/0892365803.html>

estructura y los cerramientos que generan los espacios, serían fundamentales en la concepción de propuesta de estructura que denominaría *Dom-ino* en 1914. Una retícula rectangular sirve como base para la colocación de la estructura en forma de pilotis situados a la misma distancia entre sí (Fig.1.18), en ambas direcciones, lo que, en planta, se representa como puntos en las intersecciones de la cuadrícula (Ortín Soriano, 2016). Según el escritor Barry Maitland (1979): “*La estructura Dom-ino es usada como un marco de referencia ordenador de un sistema de paredes no portantes que definen el volumen específico del edificio*”. Le Corbusier aplicó este sistema estructural de pilotis a varios proyectos como las Casas Citrohan (Fig.1.19)—, que liberaría a la estructura de su función organizativa y constituiría uno de los cinco puntos de su manifiesto de la arquitectura moderna *Les Cinq Points d'une Architecture Nouvelle* (1923) elaborado en conjunto con su primo, el también arquitecto Pierre Jeanneret.

De este modo Le Corbusier abandona el sistema tradicional de muros de carga, para pasar a una estructura levantada por pilotis. Estos pilotis debían estar levantados sobre una retícula regular, que permitiesen una organización ordenada del espacio (Ortín Soriano, 2016). Otro ejemplo destacable en el que Le Corbusier aplica el sistema *Dom-ino* es su obra maestra: la *Villa Savoye* (1928-1931). En este edificio se libera el espacio interior que es soportado por una serie de columnas proyectadas sobre una retícula cuadrada de 4 x 4 unidades espaciales (Fig.1.20), sirviendo de punto de partida para la elaboración y composición de los espacios de la vivienda. En esta obra es explícita la separación de la estructura del aspecto organizativo, donde su esqueleto de hormigón armado es el que soporta los esfuerzos, mientras las paredes definen los

espacios.

Mediante esta denominación de “osamenta” o “esqueleto”, técnicos del hormigón como el francés August Perret, tratan de extraer la “esencia del empleo del hormigón”, discurso al que se alinearía Le Corbusier. Para el arquitecto, el arte de la arquitectura “vive por su esqueleto”, y es en el monolito de hormigón “donde las presiones verticales y empujes oblicuos dan lugar al cemento de los bloques romanos; y a los redondos del acero de hormigón” (Corres Álvarez, 2002).

De esta manera el propio Le Corbusier reconoce que el proyecto *Dom-ino* no hubiese podido materializarse sin los conocimientos técnicos previos acerca del comportamiento de hormigón armado desarrollados por ingenieros como François Hennebique, Auguste Perret, y Juste Schneider. El salto cualitativo que permite calificarlo como ‘propuesta revolucionaria’ se deriva de la integración de estos conocimientos técnicos en una visión completamente distinta de la arquitectura y no su mera aplicación sobre soluciones conocidas con el único fin de abaratar su coste (Marcos, 2012).

1.1.3.2 Ludwig Mies van der Rohe

El texto, *The International Style* que Hitchcock y Johnson publicaron en 1932, fijó las bases de un nuevo estilo, en gran medida influenciado por los cinco puntos de la arquitectura moderna enunciados por Le Corbusier pocos años antes. El texto, describía tres principios generales: diferenciación de esqueleto y piel (la arquitectura como volumen), la regularidad y la negación del ornamento en busca de sinceridad constructiva (Marcos, 2012).

Un rasgo característico del Movimiento Moderno fue

su rechazo a la idea de tipo previamente establecido, y Mies refleja el cambio de actitud respecto a lo que ofrece el arquitecto mediante su trabajo. Sus teóricos asociaban al tipo con “inmovilidad”, debido a la serie de restricciones impuestas sobre el creador, quien para ellos debía ejercer completa libertad sobre el objeto (Moneo, 1978).

Mies estaba particularmente interesado en una arquitectura estructural, de manera que la estructura modula el proyecto. Su interés en la arquitectura románica y gótica, lo trasladó al refinamiento de elementos como los pilares, entendiéndose por refinamiento, la “limpieza” de la estructura, en una postura contraria a la decoración (Mies van der Rohe, 1964). Según Jiménez Gómez (2012), la incorporación del módulo estructural en la obra de Mies, optimiza los procesos de fabricación y convierte al módulo en idea de proyecto, estableciéndose además como sistema de orden visual.

Carter (1974) clasifica la arquitectura miesiana en su periodo estadounidense en las siguientes tipologías: *high-rise or low-rise skeleton frame buildings* (edificios bajos o en altura con esqueleto estructural) y *clear span buildings* (edificios con luz estructural única), que, en función de sus implicaciones estructurales y constructivas, se define como público o privado (Marcos, 2012).

Los edificios en altura, en la obra de Mies, son prismas simples de base rectangular—disposición períptera—, contruidos mediante una retícula estructural modulada en cuadrados (Fig.1.21). Edificaciones bajas además de compartir un formato rectangular, se caracterizan por ser más anchas que altas (Martí Arís, 1993).

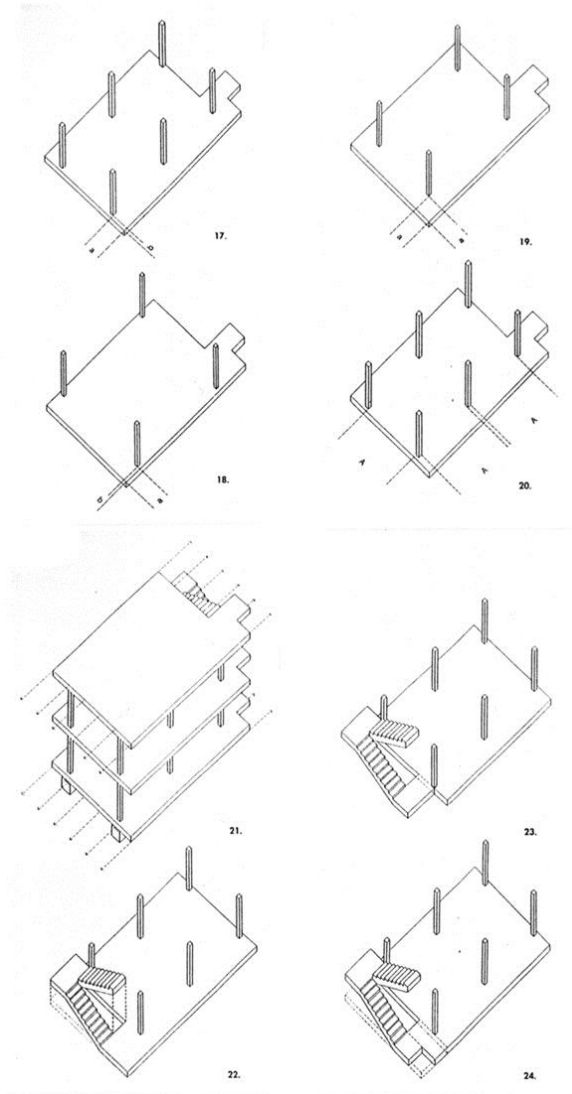


Figura 1.18. Diagrama analítico de Peter Eisenman del sistema Dom-ino de Le Corbusier

Fuente: The responsibility of form (2015). Recuperado de: <https://theresponsibilityofform.wordpress.com/2015/12/28/3-mondrians-mirror-utopia-as-projective-thinking-from-modernism-to-postmodernism/fig-1/>



Figura 1.19. Casas Weissenhof-Siedlung, Stuttgart

Fuente: Dr Lossen et Co. (1927). Recuperado de: <http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysName=redirect64&sysLanguage=en-en&IrisObjectId=5562&sysParentId=64>

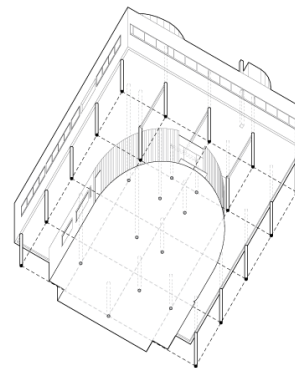


Figura 1.20. Ilustración de la retícula de la estructura de la Villa Saboye
Fuente: Moore, K. .M. (2015). Recuperado de: <http://www.karamichellemoore.com/columns>

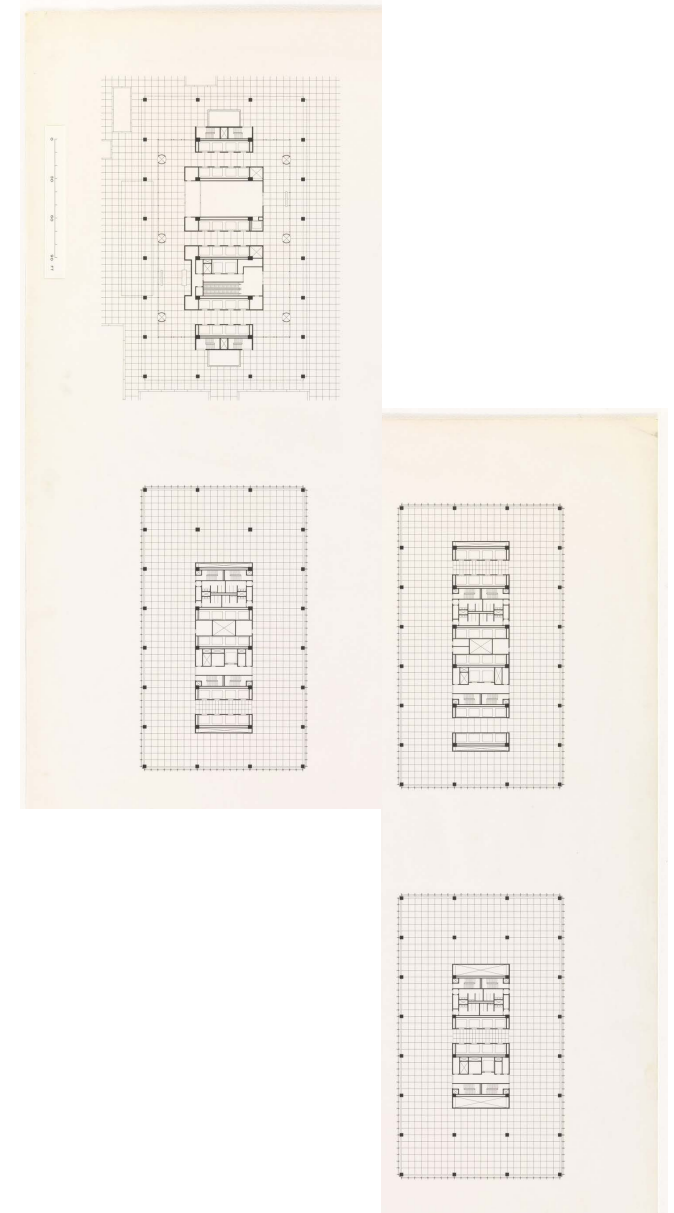


Figura 1.21. Plantas del Toronto-Dominion Centre, Toronto, Ontario, Canadá
Fuente: Mies van der Rohe, L. (c. 1963-69). Recuperado de: <https://www.moma.org/collection/works/162647>

Dentro del segundo grupo se sitúa el Crown Hall del Instituto de Tecnología (IIT) en Illinois en Chicago. Una obra de formato rectangular con estructura unidireccional (Fig.1.22). En este proyecto por vez primera aparecen vigas trianguladas en la obra de Mies —configurando pórticos de acero vistos—, que son las que salvan el espacio, permitiendo de esta manera eliminar las columnas. Según Cervilla García (2015), el techo plano y la estructura exterior serán previos a la constitución del “espacio universal sin columnas” del arquitecto. Además, con respecto a la estructura agrega:

La estructura del Crown Hall no se puede descomponer. Es un todo que abarca un espacio total, único y diáfano. La escala de la viga de canto es acorde al tamaño del espacio y a su horizontalidad. La estructura monumental es, por su propio carácter monumental, enorme, y, por tanto, indivisible en partes (Cervilla García, 2015: 298).

El desarrollo de una nueva estructura de espacio está relacionado con la búsqueda de Mies de una “poética del arte de construir” en la que se abandona el espacio delimitado por paredes, para dar paso al *clear space* (espacio diáfano), en la búsqueda de una nueva experiencia espacial (Kim, 2006).

Para salvar las luces del edificio, el arquitecto desarrolla un sistema estructural compuesto de vigas de placa exterior, similares a un exoesqueleto (Lambert, 2001).

Para el teórico alemán Fritz Neumeyer, el tratamiento estructural orientado a la ingeniería se observa también en el proyecto del edificio de las Oficinas

Bacardi (Fig.1.23). Aquí las columnas empleadas no son simples, sino cruciformes y con articulaciones en la parte superior. La solución estructural cruciforme según la arquitecta canadiense Phyllis Lambert permite un número mínimo de columnas debido a que resiste movimiento en ambas direcciones, lo que revela la intención estructural de Mies van der Rohe (Lambert, 2001).

De esta manera, Mies intentó establecer una “protoforma” que incluya el aspecto estructural, material, espacial, estético y tecnológico, persiguiendo el refinamiento de *estructura clara*, que va más allá del cliente y la especificidad del lugar (Kim, 2006).

1.2 APROXIMACIÓN A LA ESTRUCTURA DESDE EL MATERIAL

La relación entre materia y forma es objeto de estudio filosófico. Aristóteles, consideraba a la “forma y materia” como elementos inseparables de la misma substancia. El concepto de substancia es propio del concepto aristotélico de *Forma*, a la que considera como la “estructura inteligible” de las cosas. En su libro *Física* (Siglo IV a.C.), Aristóteles expresa que “forma y materia no están separados de la cosa”, y “la forma es una especie de poder inmerso en la materia” que busca convertirse en la “forma actual” (Madrado, 1995).

Como primer aproximamiento a la noción de forma, desde un punto de vista arquitectónico-estructural, resulta apropiada la siguiente definición: “La forma es, en última instancia, el producto conceptual de nuestra imaginación, y el producto material de nuestra capacidad para manipular y procesar materiales. Por lo tanto, la forma estructural tiene límites tanto

metafísicos como mecánicos” (Dooley 2004, p.115). Así mismo, Dooley considera que los límites metafísicos se definen por la habilidad del diseñador para concebir la forma, mientras los límites mecánicos se definen por las propiedades mecánicas del material y la tecnología que le da forma o procesa.

En la arquitectura, durante la década de 1850 y 1860, un nuevo movimiento vinculado a la crítica empieza a tomar fuerza, liderado por el alemán Gottfried Semper—arquitecto y crítico de arte. Semper considera a la forma y el material como inseparables, y destaca el conocimiento de las posibilidades técnicas en la manipulación de un material para obtener formas (Semper, 2004). También se pronuncia en torno a la materialidad el arquitecto francés Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, quien consideraba necesario un conocimiento de la naturaleza de los materiales. Solo así, su uso permitiría utilizar un “sistema armonioso de proporciones entre todas las partes” en la construcción de la obra, a la que consideraba como base del diseño, esencial en su teoría racionalista (Viollet-le-Duc, 1987).

En la teoría de Semper, existe una correlación entre materiales (tela, arcilla, madera, piedra) con las artes técnicas asociadas con ellos (textiles, cerámica, tectónica/carpintería, estereotomía/albañilería) (Cache, 2000). Esta idea está basada en la tipología que Semper desarrolla de técnicas artesanales pre-arquitectónicas y elementos arquitectónicos básicos presentes en su libro *Die vier Elemente der Baukunst* (Los Cuatro Elementos de la Arquitectura) de 1851. De acuerdo con Semper, estos procedimientos inicialmente se desarrollaron con materiales específicos, pero posteriormente serían aplicados a diferentes materiales (Hildebrand, 2015).

En *Der Stil*—su principal trabajo teórico—, Semper incluye al metal como quinto elemento básico, al que no asigna ninguna técnica en específico, y considera que puede procesarse con cualquiera de las cuatro técnicas básicas.

En este último libro, Semper emplea el término “tectónico” para referirse a “el arte de ensamblar elementos rígidos como tablas, en un sistema rígido”. Estos elementos a los que Semper se refiere, son “principalmente de fuerza relativa, es decir, resistentes a fuerzas que trabajan verticalmente a lo largo de su longitud” (Semper, 2004).

1.2.1 Tectonicidad y estereotomía

Influenciado por el pensamiento de Semper, el arquitecto inglés Kenneth Frampton en su libro *Labour, work and Architecture* (2002), considera que: “Partiendo de la hipótesis de lo que se refiere a la relativa autonomía de la arquitectura, la forma construida era tanto estructura y construcción como creación y articulación del espacio”. De aquí la importancia que Frampton le otorga a la “unidad estructural”, hacia la cual se debe retornar, y que debería entenderse como la esencia de la forma arquitectónica, y explica de la siguiente manera los dos procedimientos materiales en el que se divide la forma construida:

“La tectónica de la trama, en la que las distintas partes se conjugan constituyendo una unidad espacial única; y la estereotómica de la masa que trabaja a compresión, que, al conformar un espacio, lo hace por superposición de partes iguales” (Frampton, 2002: 23).



Figura 1.22. Vista exterior nocturna del Crown Hall, Instituto de Tecnología de Illinois, Chicago, Estados Unidos

Fuente: Corey Gaffer Photography (s.f.). Recuperado de: <http://www.gafferphotography.com/corey-gaffer/e9beis9pe7k1ivd8zmeux8wov8nfek>

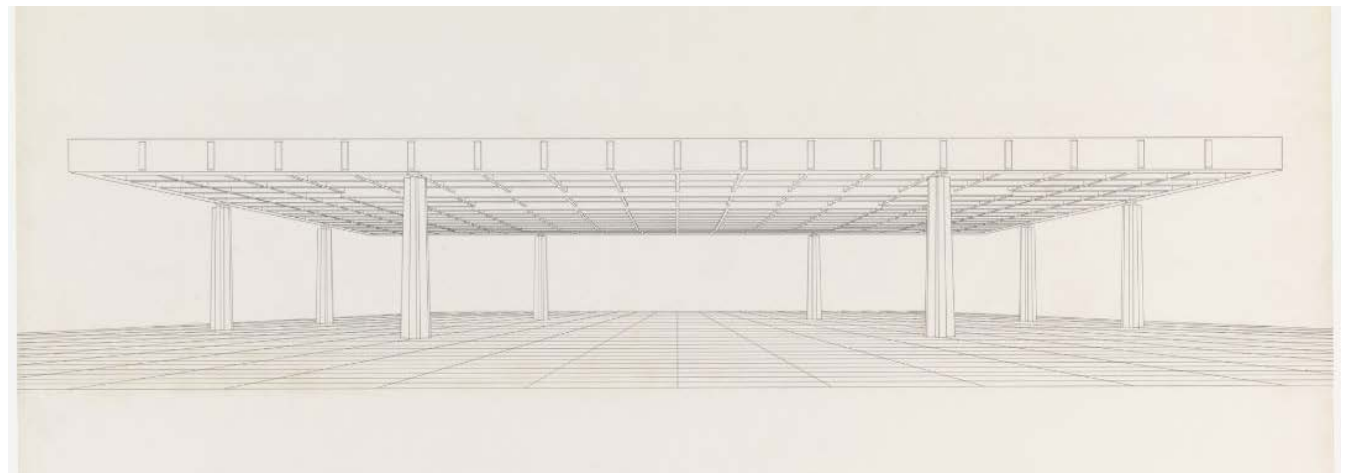


Figura 1.23. Perspectiva del Edificio de Oficinas de Bacardi, Santiago de Cuba, Cuba

Fuente: Mies van der Rohe, L. (1957). Recuperado de: https://www.moma.org/collection/works/778?classifications=18&include_uncataloged_works=1&locale=en&page=7

Para Frampton son precisamente estos términos desarrollados por Semper los que le permiten articular el “acto de construir” con la arquitectura (Frampton, 1995).

El arquitecto español Campo Baeza (2003) sugiere que —desde un punto de vista estructural—, en la arquitectura estereotómica, la fuerza de la gravedad se transmite de manera continua, que implica continuidad en el sistema estructural y constructivo. Para él, en la arquitectura tectónica la fuerza de la gravedad se transmite de manera sincopada, reflejada en un sistema estructural con nudos y juntas, de construcción articulada.

Viollet-le-Duc (2018) consideraba al método de la construcción como una de las vías para alcanzar la “verdad”. A esta verdad según el arquitecto se accede por medio del empleo de materiales acorde a sus cualidades y propiedades, de modo que el aspecto artístico que trabaja la forma aparente queda de lado.

Tiempo después Mies (1964), se pronunciaría a favor de la autonomía de la estructura basada en cada material, mostrándose en contra de la idea de “formar algo desde afuera”.

De esta manera, se puede deducir que la verdad de una edificación reside en la solución estructural, que para ser determinada y formulada considera las dimensiones y extensiones del material. Así, la relación entre estructura y material se establece como inseparable (Muñoz Miranda, 2011).

La importancia de la construcción según el arquitecto Helio Piñón (2009) en la arquitectura no reside en

una “técnica a resolver” sino en “un instrumento para concebir”, y considera que la sistematicidad propia de la construcción, es la que convierte el acto de construir en arquitectura—coincidiendo de esta manera con el pensamiento de Frampton—, de manera que “no hay proyecto sin materia”. En este sentido Mies van der Rohe aprehende el aspecto constructivo y lo radicaliza al considerarlo como un mecanismo que permite a la obra arquitectónica acceder a la belleza una vez finalizado este procedimiento, es decir cuando se ha edificado (Boyken & Oestmann, 1990). Además, considera a la tecnología como parte de la arquitectura, donde las líneas de la arquitectura griega, romántica y gótica son “técnicas” inspiradas en “presiones y tensiones” (Dessauer, 1927).

A continuación, tomando como referencia el libro *Support / Materialise : Columns, Walls, Floors*, (2013), se presentan a continuación definiciones de la “Estereotomía de la masa” y “Tectonicidad de la trama” denotando su aspecto mecánico.

1.2.1.1 Estereotómica de la masa

Las edificaciones “sólidas” o de “masa” se construyen de manera que todos los lados de la figura se cierren. Todas las cargas se transmiten por paredes y pisos de forma lineal, y son estos elementos estructurales los que conforman un sistema en el que ambos funcionan de manera conjunta soportando cargas y arriostrando.

Sus paredes sólidas absorben las fuerzas resultantes de su peso propio y de cargas impuestas. Actúan como diafragmas y pueden ser usados con propósito de arriostramiento de piso o paredes. Las paredes estructurales soportan únicamente su peso propio y de

ser el caso el de las demás paredes de arriostramiento ubicadas encima, y están diseñadas para transferir cargas horizontales consecuencia del viento, presión del suelo o pandeo.

Las losas cumplen la función de arriostrar, transferir carga y resistir al empuje a modo de placas—transfiriendo fuerzas horizontales. Dependiendo del sistema, material o método constructivo, las losas usadas en los sistemas constructivo de “masa” pueden ser unidireccionales o bidireccionales.

Decisiones arquitectónicas como la generación de vanos o el tamaño de habitaciones, requieren el conocimiento de la capacidad de carga de elementos de soporte como vigas y dinteles, así como el procedimiento que requirió la losa para ser construida.

1.2.1.2 Tectónica de la trama

Las edificaciones en esqueleto o marco permiten amplios espacios sin columnas, y permiten omitir paredes divisorias internas. Todas las cargas se transmiten por elementos como vigas, columnas y losas, que transfieren cargas y fuerzas al plano vertical y mantienen a la estructura estable del impacto de fuerzas horizontales. De esta manera se acumulan las cargas en el plano horizontal mediante un sistema de vigas, y posteriormente se concentran las cargas en el plano vertical en cada soporte que llevará la carga a los cimientos. Es el “nudo”—transición entre miembros horizontales y verticales— en recorrido de bajada de cargas el que identifica el lugar en el que las cargas del piso para que éstas continúen su trayecto hasta los cimientos.

Los edificios diseñados en este tipo de estructuras requieren mucha disciplina en el momento de su diseño, ya que involucra sistemas que siguen una “lógica estricta”, y obligan al diseñador a pensar en términos de “órdenes, sistemas y jerarquías”; y pueden ser contruidos con cualquier material que sea capaz de absorber fuerzas de tracción y compresión de manera simultánea.

En estas edificaciones se ha considerado a la prefabricación como una manera eficaz en términos de tiempo y costo, dando lugar a nuevos métodos de unión, diferentes a las obras fundidas en sitio.

1.2.2 Materiales estructurales

Los principales materiales estructurales utilizados en la arquitectura expuestos a continuación, consideran sus propiedades y constructibilidad, que permita entender las estructuras tectónicas y estereotómicas, desde un punto de vista estructural, haciendo énfasis en el hormigón armado—material utilizado en las obras a analizar.

1.2.2.1 Hormigón armado

En el siglo XX, el hormigón armado se convirtió en el material de construcción preferido, aunque la estructura permanecía oculta en la composición del edificio. El uso de hormigón armado en vigas, lo realiza por primera vez el inglés Wilkson, usando métodos empíricos de dimensionamiento. Y el primero que racionaliza la teoría del concreto es el estadounidense Thaddeus Hyatt en 1877, recomendando el uso de estribos y barras dobladas en las vigas para combatir efectos de cizallamiento (Rebello, 2007).

1.2.2.1.1 Características

El hormigón armado resulta de unión entre el concreto y el acero, que recibe el nombre de adherencia, y ocurre por medios mecánicos (fricción) y por el efecto ligante propiciado por el cemento (Rebello, 2007). De esta manera, según Andrea Deplazes (2005) el hormigón armado podría considerarse como único material que posee esta cualidad de “bipolar”.

Para que el hormigón adquiera forma, es necesaria la construcción de un elemento que lo tolere: el encofrado. A través de la carpintería o construcción en madera, que posee sus propias de construcción e influencia en la búsqueda de formas del hormigón.

Cuando es encofrado en el lugar de construcción se conoce como *hormigón in situ*, y cuando son producidos en fábrica sus componentes, se trata de hormigón prefabricado. Este molde en el que es vertido debe ser fácil de elaborar y montar. Además, debe ser suficientemente resistente, de manera que sus dimensiones no se distorsionen en el proceso de vertido y compactación del hormigón (Macdonald, 2001).

a) Concreto

El concreto está constituido por una mezcla controlada de materiales que dan origen a un volumen denominados agregados, y de material ligante, llamado aglomerante. Los principales materiales son: 1) agregados; piedra y arena y 2) ligante: aglomerante. El efecto pegante se alcanza con la presencia de agua. Las características del concreto se definen por la proporción entre estos materiales, y determinan la resistencia del material, que sirve como parámetro para el cálculo de

estructuras. La resistencia del proyecto depende de la resistencia que el hormigón adquiere a los 28 días y se la denomina f_{ck} . Al momento de ser manipulado se considera el hormigón como óptimo si presenta las siguientes características: facilidad de trabajo, buena compactibilidad, consistencia plástica, fácilmente moldeable, buena cohesión, baja tendencia a la segregación, buena capacidad de retención de agua. Mientras que, ya fraguado debe presentar las siguientes características: buena resistencia, microestructura de hormigón homogénea, densa y consistente, superficie uniforme sin orificios y resistencia al clima e influencia externa (Deplazes, 2005).

La resistencia a compresión que presente el material es menor en relación a la de tracción y corresponde a 1/10 de la misma. El hormigón presenta deformaciones propias del material, independiente de las cargas aplicadas. Otro fenómeno que se presenta en el material, es la retracción, en la que ocurre una disminución del volumen del concreto para lo que es necesario humedecerlo los tres primeros días (Rebello, 2007).

b) Acero

Según el ingeniero civil brasileño Rebello (2007), el acero estructural debe presentar la cualidad de ser deformable, de manera que informe, a través de su deformación, cuando esté solicitado por encima de lo previsto. En el hormigón armado, el acero utilizado tiene forma de barras cilíndricas de radios variables.

En el proceso de transmisión de tracción del concreto al acero en las estructuras de hormigón armado da lugar a pequeñas fisuras. Para disminuir las fisuras

se utilizan armazones más numerosas y de diámetros menores. Estas armazones se utilizan tanto para absorber las tracciones sujetas al concreto y que este no resiste, como para aliviar esfuerzos a compresión a la que trabajan elementos como los pilares.

1.2.2.1.2 Arreglos (Clasificación de Andrea Deplazes)

a) Sistemas con elementos lineales

Los sistemas con elementos lineales están conformados por elementos estructurales como vigas y columnas. En el caso de las vigas, son elementos estructurales cargados principalmente a flexión. Así, la magnitud del momento flector influencia las dimensiones del elemento. Mientras que, en el caso de las columnas, éstas transfieren cargas horizontales, además de fuerzas cortantes (viento y movimientos sísmicos) lo que implica secciones transversales mayores (Deplazes, 2005).

Arcos

Es un miembro lineal curvo (Fig.1.24), que está sujeto a compresión axial y flexión. En caso de tener una forma óptima puede trabajar solo axialmente. Su forma ideal es la correspondiente a la curva catenaria, en la que se deforma por la acción de su propio peso.

Marcos de portal

Las conexiones rígidas entre elementos lineales horizontales y verticales dan como resultado un marco de portal (Fig.1.25). La sección transversal de los elementos verticales—debido a los momentos de

flexión—, necesariamente debe ser mayor al de una columna que lleva carga concéntrica.

El plano de los marcos de portal supone un sistema estable y arriostrado en el plano del marco, que actúa como placa en edificios de uno y dos pisos. Para edificios de varios pisos se arriostra mediante placas a manera de losas o paredes.

Marcos

Los marcos (Fig.1.26) están compuestos de elementos prefabricados como vigas, columnas y losas, y columnas empotradas para dar paso a un marco rígido.

En edificaciones de uno y dos pisos las fuerzas horizontales son resistidas por las columnas empotradas, mientras en edificaciones de tres o más pisos las cargas horizontales son transmitidas a los cimientos por muros de corte.

b) Sistemas con elementos planos

Los sistemas con elementos planos están conformados por elementos estructurales como losas y placas. En el caso de las losas—unidireccionales y bidireccionales—, son elementos estructurales que reciben carga perpendicular a su plano y están sujetas a flexión. Mientras que, las placas se presentan en forma de paredes y están sujetas a cargas en su plano, de manera que resiste fuerzas axiales (Deplazes, 2005).

Placas plegadas

Se trata de superficies planas e inclinadas (Fig.1.27) resistentes a cortante a lo largo de sus pliegues. En razón de su rigidez, las placas tienen una mayor

capacidad de carga que la ajustan a su plano para transferir a los soportes.

Cáscaras

Se podría definir a las cáscaras (Fig.1.28) como “delgadas paredes tridimensionales” que debido a su moldeabilidad han sido construidas en hormigón armado y pretensado. La forma ideal de una estructura tipo cáscara se logra cuando la misma está sujeta a su propio peso y únicamente fuerzas axiales y de corte en el plano de la cáscara. De esta manera, el radio de esbeltez puede ser de hasta 1:500.

1.2.2.2 Mampostería

La mampostería puede definirse como un elemento de una o varias capas construido a partir de piedras naturales o hechas por el hombre, que se traban, unidas con mortero (Dambacher, Elsener & Leuthold, 2005).

El arquitecto alemán Werner Lindner (1938), agrega con respecto a la mampostería que es una “estructura que permanece visible en su superficie y funciona a través de ella”, y sobre la cual Mies van der Rohe destacaba su “lógica en la unión, patrón y estructura” (Blake, 1996).

Los bloques que conforman este material presentan la particularidad de regular dimensión del mismo—espesor, longitud y altura. Si se considera hormigón armado como material estructural, una lectura respecto al primero, permite deducir su limitada resistencia a esfuerzos a tracción por su condición de material compuesto por varios elementos.



Figura 1.24. Atelier Esders (fábrica de ropa) de Auguste Perret, París, Francia
Fuente: The Modern House (s.f.). Recuperado de: <https://www.themodernhouse.com/journal/seeing-auguste-perret-exhibition-aa-gallery/>



Figura 1.26. Ampliación del edificio LinMij de Hermann Hertzberger, Amsterdam, Países Bajos
Fuente: Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures : a Handbook (2005). Recuperado de: http://www.sze.hu/~eptansz/Deplazes_Constructing_Architecture.pdf

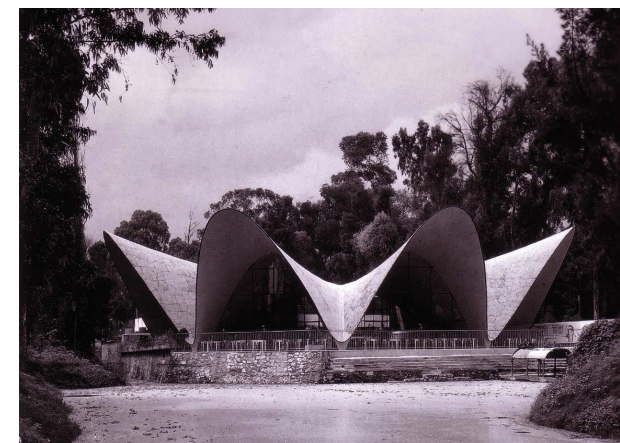


Figura 1.28. Restaurant Los Manantiales de Félix Candela, Ciudad de México, México
Fuente: Archdaily (2018). Recuperado de: <https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela>



Figura 1.25. Garage Ponthieu de Auguste Perret, París, Francia, 1905
Fuente: Art & Architecture (s.f.). Recuperado de: <http://www.artandarchitecture.org.uk/images/conway/01e8a796.html>



Figura 1.27. Placa plegada de la cubierta del Hipódromo de Groenendael, Groenendael, Bélgica, 1980
Fuente: Formfinding Lab (2017). Recuperado de: <https://formfindinglab.wordpress.com/2017/03/22/belgian-20th-century-shells-in-architecture-and-art/>

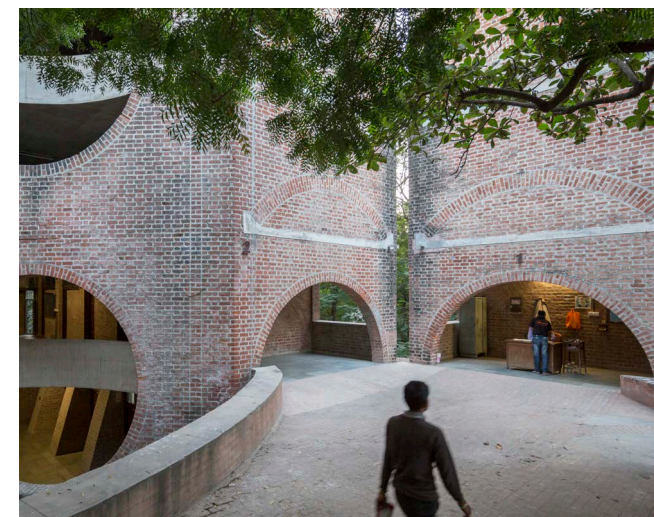


Figura 1.29. Instituto Indio de Administración de Louis Kahn, Ahmedabad, India
Fuente: Plataforma Arquitectura (2017) © Laurian Ghinitoiu. Recuperado de: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/805725/el-legado-de-louis-kahn-en-ahmedabad-bajo-el-lente-de-laurian-ghinitoiu?ad_medium=gallery

Formas en arco—que en hormigón dada la maleabilidad son factibles—, en la construcción en mampostería constituyen una solución característica para salvar grandes distancias, en el que el peso del material genera fuerza—se logra al trabar los bloques produciendo un “efecto adhesivo” entre ladrillo y mortero—y estabilidad necesarios (Fig.1.29)

1.2.2.3 Madera

La madera era un material de fácil disponibilidad—utilizado en los primeros edificios aporticados—, que ofrecía suficiente estabilidad y era fácil de procesar. Sin embargo, actualmente la construcción en madera es rentable por lo general en zonas geográficas boscosas.

Las diferentes variantes de la construcción en madera se han convertido en una importante forma de expresión arquitectónica, en la que la durabilidad de las estructuras de madera depende mucho más del detalle (articulaciones) que los demás materiales para la construcción (Baurmann, Euler, Niederwöhrmeier & Niederwöhrmeier, 2013).

Baurmann et al. (2013) consideran necesario diferenciar entre las uniones artesanales y las industrializadas. Mientras en el trabajo artesanal se utilizan clavijas de madera, empalmes y uniones dentadas, para asegurar la posición de las vigas—en un sistema pensado para transmitir principalmente fuerzas de compresión—aunque la complejidad del trabajo manual no ha permitido comprobar matemáticamente su capacidad estructural.

Uno de los requisitos para las construcciones industrializadas en esqueleto (Fig.1.30) de madera

prevé el uso de sujetadores y accesorios de acero, elementos que pueden ser objeto de análisis de las fuerzas a las que están sujetos.

Partiendo de la idea que considera a las edificaciones de madera como aquellas que originaron la arquitectura, el hormigón se asemeja a este material, que además sirvió como analogía para la construcción en distintos materiales, cuyos elementos debieran ser diseñados para soportar esfuerzos tanto a compresión como tracción. La madera es un material que permite una clara lectura a partir de su lógica constructiva como las construcciones en esqueleto pertenecientes al orden tectónico y macizas perteneciente al orden estereotómico (Fig.1.30 y Fig.1.31).



Figura 1.30. Instalaciones de playa de Alfred Krähenbühl, Zug, Suiza
Fuente: DETAIL 1 (2000). Recuperado de: <https://inspiration.detail.de/lakesi-de-bathing-facilities-in-zug-switzerland-107237.html>

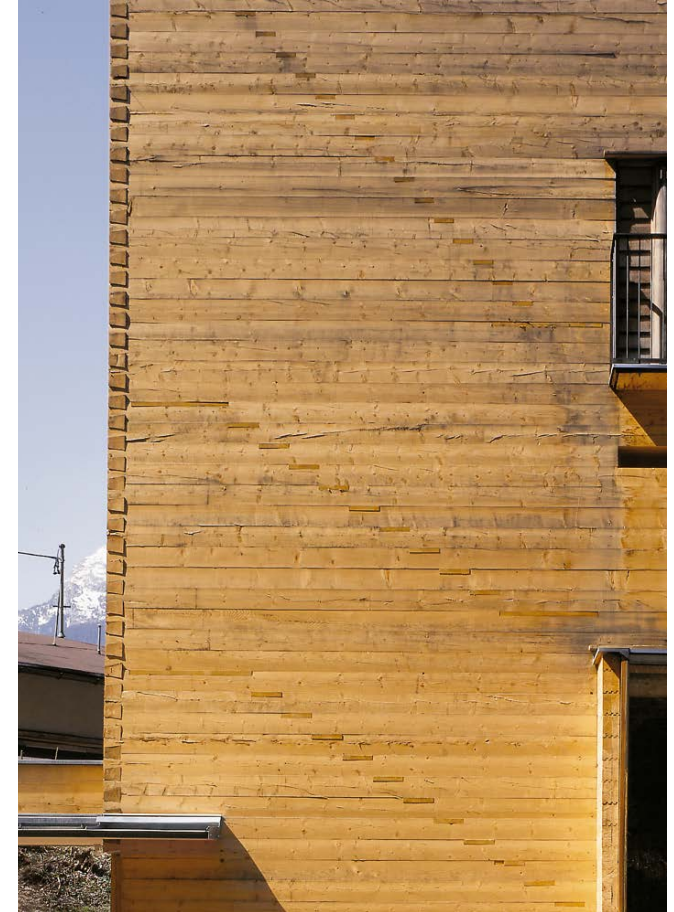


Figura 1.31. Torre residencial de Alfred Krähenbühl, Brixlegg, Austria
Fuente: DETAIL 1 (2004). Recuperado de: <https://inspiration.detail.de/technology-timber-log-construction-today-house-in-brixlegg-tyrol-108135.html?lang=en>

Capítulo.2

La estructura en la arquitectura

2.1 HISTORIA DE LA RELACIÓN ARQUITECTO-INGENIERO

El ingeniero y filósofo Bill Addis considera las palabras 'ingeniero' y 'arquitecto' como un anacronismo para cualquier persona en actividad antes de 1450 (Addis, 2007). La palabra 'arquitecto' se deriva del antiguo griego *architekton*. El mismo que puede ser traducido como 'maestro constructor' o 'gerente de construcción', que no tiene que ver con la definición actual de arquitecto. Según el historiador de arquitectura Andrew Saint (2007), el término 'arquitecto' era familiar desde Vitruvio, y en realidad la división de la arquitectura en dos diferentes áreas de experticia, la del arquitecto y la del ingeniero, es un hecho bastante reciente.

En la Edad Media, arquitecto se denominaba a técnicos, a veces patronos o clientes como los que impulsaban el proyecto. Por ese mismo tiempo el término 'ingeniero' se usó para los expertos en maquinaria para la gestión de agua o la guerra (Saint, 2007).

A finales de la Edad Media, la gente involucrada en la coordinación técnica y el diseño de edificios, habían desarrollado habilidad en la albañilería y carpintería, aunque estos experimentados artesanos, no poseían una opinión que explicara la razón estructural de su trabajo (Addis, 2007). Saint afirma que, durante el Renacimiento, la distinción entre arquitecto e ingeniero obedecía a los tipos de diseño que se encargaban. Mientras el arquitecto diseñaba edificios seculares o religiosos, el ingeniero hacía lo propio con fortalezas, muros, puertos, canales o maquinaria para guerra (Luyten, 2012).

La separación entre arquitectura e ingeniería

ocurrió entre 1730 y 1900, y de acuerdo a Saint se institucionalizó durante el siglo XVIII en Francia en el *Corps du Génie*, cuyos ingenieros se encargaron de la guerra e infraestructura; y en el *Bâtiments du Roi*, cuyos arquitectos proveían de vivienda al rey (Saint, 2007). La Revolución Industrial fue determinante en esta separación con la emergente diversificación en la construcción y el consecuente desarrollo de nuevos materiales. Estas fueron unas de las principales razones para el surgimiento de las especializaciones, además avances en los métodos de cálculo de estas nuevas estructuras, acentuarían aún más la separación entre arquitectura e ingeniería (Flury, 2011).

Este cisma, y la necesidad en la que se ven ambas profesiones involucradas en un proyecto arquitectónico, coloca a los ingenieros y arquitectos en una posición más dialéctica, donde sus opiniones más antagónicas necesitan ser reconciliadas. Es así, que para Luyten (2012), el desarrollo de un proyecto arquitectónico de calidad requiere no solo la capacidad de diseño del arquitecto e ingeniero estructural sino su habilidad para colaborar (Luyten, 2012).

Visión de la arquitectura desde la ingeniería estructural

En la colaboración con los arquitectos, la ingeniería estructural ha buscado reivindicar su labor creativa en los proyectos, de tal forma que el diseño no sea obra exclusiva del arquitecto. Ante esta falta de reconocimiento, el ingeniero Alejandro Bernabeu Larena en su tesis doctoral *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea: El trabajo de Cecil Balmond*. (2007), determina tres factores.

Primero: la falta de capacidad o interés de los ingenieros, que prefieren mantenerse al margen del proceso de diseño, centrándose en el cálculo de la estructura. Ingenieros como Ove Arup o Edmund Happold han considerado que el ingeniero no debe eludir su responsabilidad social en relación al entorno construido y participar del desarrollo formal de los proyectos.

Segundo: la indiferencia de los ingenieros estructurales con la historia, que es la que permite tener referentes y sentar bases para futuros esfuerzos, de esta manera según Bernabeu, la educación cobra importancia por ser el ámbito donde da una "valoración histórica". Mientras en las escuelas de arquitectura se otorga importancia a la historia, arte y construcción, en la ingeniería apenas existe interés en lo histórico.

Tercero: el escaso esfuerzo y disposición de los ingenieros para reflexionar y escribir acerca de sus criterios formales y planteamientos conceptuales, limitándose a cuestiones técnicas.

Son estos factores los que según Bernabeu, determinan que la ingeniería estructural sea considerada únicamente en términos técnicos, pasando por alto el potencial artístico de la disciplina.

La formación del ingeniero en términos creativos ha sido motivo de estudio por parte del ingeniero brasileño Yopanan Rebello. En la tesis de maestría de Rita de Cassia Pereira Saramago (2011) titulada *Ensino de estruturas nas escolas de arquitetura do Brasil* (Enseñanza de estructuras en las escuelas de arquitectura de Brasil), Rebello considera a la creatividad como "un mecanismo, un proceso, de

activar, entonces, en la etapa de proceso creativo". Persiguiendo esta idea, Rebello montó un curso en aquel año al que denominó *Criatividade nas Estruturas, nas Soluções Estruturais* (Creatividad en las Estructuras, en las Soluciones estructurales).

Aunque se trata de un curso que pudiera servir a los arquitectos, según Rebello, está destinado a los ingenieros ante la "falta de creatividad estructural" de los recién graduados. Para Rebello, el ingeniero "pierde" al no saber de arquitectura, ante la oportunidad de mejorar la estructura por las solicitudes arquitectura, sin embargo, la repetición de soluciones que practican, acaba con la creatividad.

2.1.1 Relación arquitecto-ingeniero y el desarrollo de la forma estructural

El filósofo suizo Christoph Baumberger, en su texto *Structural Concepts and Spatial Design: On the Relationship Between Architect and Engineer* (Conceptos estructurales y diseño espacial: sobre la relación entre el arquitecto e ingeniero) publicado en 2011, explica la relación arquitecto-ingeniero estructural mediante tres modelos: "Monólogo del arquitecto o ingeniero", "Soliloquio del ingeniero-arquitecto" y el "Diálogo entre arquitecto e ingeniero como socios igualitarios".

2.1.1.1 Monólogo

Se trata del modelo más frecuentemente practicado y según Baumberger, existen dos manifestaciones en esta relación.

La primera consiste en la independencia de funciones

del arquitecto y el ingeniero estructural. El arquitecto diseña el edificio y el ingeniero calcula la estructura planificada. El trabajo del ingeniero se reduce a resolver aspectos técnicos del diseño. Su trabajo se limita a aplicar un sistema de estática a la estructura proporcionada por el arquitecto. La parte conceptual del ingeniero estructural corresponde al dimensionamiento de elementos, de manera que sean de calidad y económicos, y ayuden al arquitecto a materializar conceptos formales y espaciales. Esta relación define al ingeniero como técnico y al arquitecto como artista, así como el ingeniero como constructor y el arquitecto como diseñador.

Mientras el trabajo del ingeniero o constructor está sujeto a términos racionales y funcionales, el del arquitecto está ligado a la estética y simbolismo. Debido a que el arte de construir no es un arte liberal, requiere de la ingeniería estructural y la construcción. Según Baumberger, el ingeniero no se limita a llevar a cabo únicamente cálculos para el diseño arquitectónico, sino que también desarrolla nuevos conceptos de diseño. El "Monólogo" se caracteriza por no ser una relación equitativa entre las partes en el proceso de diseño. El arquitecto se sirve del ingeniero, que, con sus servicios, interviene en una etapa puntual en el proceso de construcción y planificación. El modo en que se vincula el arquitecto con el ingeniero, no permite hacer uso del potencial arquitectónico de nuevos conceptos estructurales, que podría tener un impacto positivo en el costo de la construcción y en su calidad.

La segunda manifestación es el monólogo del ingeniero. Si en la primera manifestación el arquitecto consultaba al ingeniero, aquí éste último es el único responsable. En puentes o estructuras similares de la ingeniería

civil, es el ingeniero quien intenta desarrollar la forma conforme a sus criterios racionales y funcionales. En su intento de incorporar valores estéticos y simbólicos en el proceso de diseño, los resultados suelen ser pobres.

Un caso paradigmático de la manifestación arquitectónica del monólogo, es la Ópera de Sídney, donde la relación arquitecto-ingeniero estructural se tornó complicada por la falta de entendimiento entre las partes. El arquitecto danés Jørn Utzon comenzó a trabajar para el concurso de la Ópera de Sídney sin la colaboración de ningún ingeniero. Su propuesta estaba influenciada por las cubiertas en forma de cascarón de hormigón armado (Fig.2.1) que permitían la expresión de formas orgánicas con poco material, que representaba un ahorro económico. Sin embargo, la propuesta de Utzon no estaba apoyada en ninguna ley geométrica-matemática o principio estructural, sino

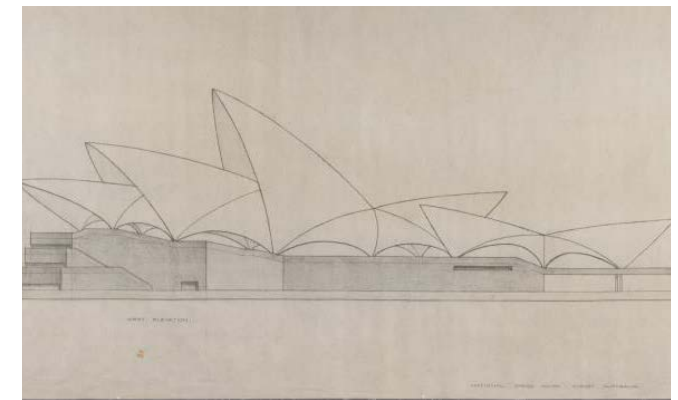


Figura 2.1. Elevación oeste incluido en la documentación del concurso de la Ópera de Sídney presentado por Utzon

Fuente: Utzon, J. (1956). Recuperado de: <https://www.records.nsw.gov.au/archives/magazine/galleries/sydney-opera-house-drawings#>

únicamente en la estética de la figura. La ausencia de criterios estructurales en la etapa del concurso derivaría en problemas en las etapas de diseño y proceso constructivo que retrasarían la obra e incrementarían el costo de la obra en un 1300 % (Rey Rey, 2016).

El equipo de diseño estructural liderado por el ingeniero inglés Ove Arup colaboró con el desarrollo de una solución al problema que planteaba la cubierta propuesta por el arquitecto. Aunque la propuesta inicial de Utzon destacaba la ligereza de las capas de concreto, el equipo de Arup concluyó que la escala del edificio junto con verticalidad de las secciones transversales generaba momentos flectores que imposibilitaban construir la propuesta original. Éste representó el punto de quiebre en una relación donde el arquitecto no aceptaba ninguna propuesta que alterara su diseño, conociendo la dificultad que representaba esa geometría para ser analizada—incluso habiendo sido pionera al usar cálculos matemáticos en computadora.

Finalmente, la transformación de la cubierta—de formas libres a esféricas—se reflejó en dos aspectos: 1) geométricos: aquí las superficies se alteraron para permitir que sean representadas gráficamente, analizadas estructuralmente y construidas (Fig.2.2) y 2) tipológico: los cascarones de 12 cm de espesor se reemplazaron por nervios de concreto dispuestos en forma de abanico de 2 metros de espesor (Fig.2.3) (Rey Rey, 2016).

2.1.1.2 Soliloquio

En ciertos casos, el ingeniero y el arquitecto son la misma persona. Pertenecen a este grupo arquitectos-ingenieros como: Pier Luigi Nervi, Eladio Dieste,

Santiago Calatrava, Félix Candela, Frei Otto entre otros. Para ellos diseñar es construir, donde la forma arquitectónica nace de principios estructurales y de construcción, y en casos excepcionales es la propia estructura. La estructura no solo cumple criterios de racionalidad, sino de estética y funcionalidad. Así el acto de construir es también cuestión de diseño.

En función de conceptos formales (organización espacial) se desarrolla la estructura, que por lo general va más allá de las necesidades constructivas, para generar una figura llamativa, que, en su intención de interpretar el flujo de fuerzas, las expresa de manera exagerada, incluso llegando a tener un carácter decorativo u ornamental.

Con los grandes arquitectos-ingenieros, esta tendencia hacia la exageración de la estructura—en su búsqueda personal de expresión artística—lo que permite es interpretar el comportamiento estructural de sus elementos. La representación exagerada del comportamiento estructural, usualmente acompaña la afición por las formas orgánicas (Fig.2.4). Los edificios característicos de los arquitectos-ingenieros muestran una tendencia hacia la “disolución de la masa” y estructuras cada vez más delicadas. De este modo, buscan que el objeto se vea más ligero de lo que es. Esta postura origina un conflicto entre el diseño de formas y determinación de espacios.

El italiano Pier Luigi Nervi es probablemente la figura más visible del arquitecto-ingeniero, quien desarrolló simultáneamente conceptos arquitectónicos y estructurales. Según Nervi, la “arquitectura estructural”—de la cual era uno de los exponentes—sintetizaba de manera simultánea los tres problemas

esenciales de la disciplina: estructural, constructivo y arquitectónico (Andreani & Perugini, 2013). Según sus compatriotas, el ingeniero-arquitecto Stefano Andreani y el ingeniero estructural Paolo Perugini (2013), Nervi era consciente que un entendimiento preciso del comportamiento estructural conducía a una economía de diseño. Señalan además que, en los inicios de los proyectos, Nervi empleó métodos intuitivos y simplificados, que lo llevaron adoptar geometrías más adecuadas para un entendimiento estructural.

De esta manera concibió el principio estructural “lamella”, visible en hangares de aviones (Fig.2.5) construido en Orvieto para la Fuerza Aérea Italiana en 1935. Para cubrir las grandes distancias que exigía el programa, propuso la estructura “lamella” en forma de cáscara (Leslie, 2002). Consistía en una serie de arcos en dirección opuesta que se intersecaban, diagonales al volumen rectilíneo inferior. Según el arquitecto estadounidense Thomas W. Leslie (2003), cada viga es capaz de soportar cargas gravitacionales y laterales, y debido a su proximidad, las cargas son distribuidas por toda la trama.

2.1.1.3 Diálogo

El modelo de cooperación en el proceso de diseño entre arquitectos e ingenieros como ‘socios igualitarios’ no es frecuente. Se trata de un modelo sin jerarquías en la relación arquitecto-ingeniero. Una de las primeras manifestaciones abogando por esta relación, es la del arquitecto y diseñador alemán Peter Behrens, que en su lectura *Art and Technology* (Arte y Tecnología) de 1910, consideraba necesaria una relación arquitecto-ingeniero donde ninguno de los dos este subordinado. El *diálogo* consiste en dos especialistas que enfocan

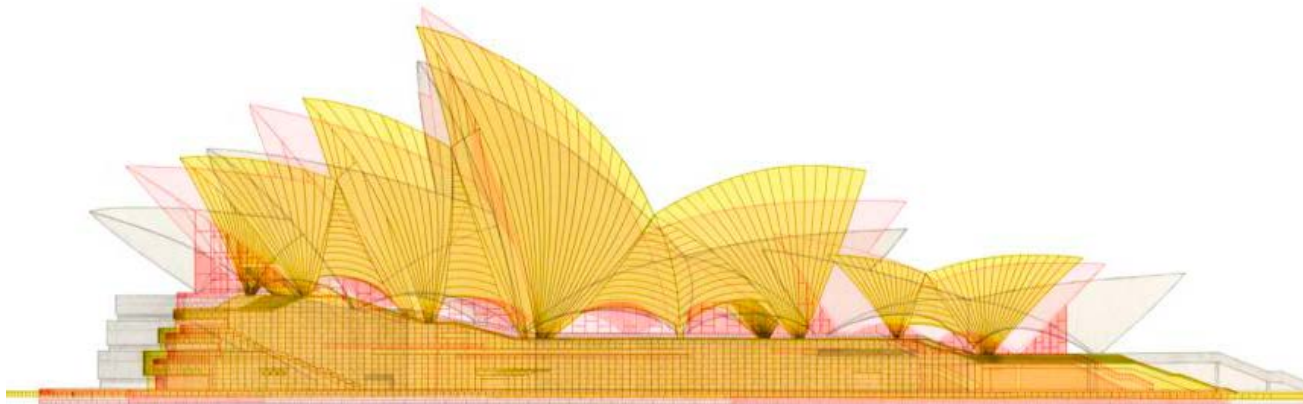


Figura 2.2. Comparación de la evolución de la geometría de la cubierta de la Ópera de Sídney. El color gris corresponde a la geometría de la competencia, el rojo a la forma parabólica y el amarillo a la forma esférica
Fuente: Taylor & Francis Group (2016). Recuperado de: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315730769>



Figura 2.3. Nervios de concreto que dan la forma esférica a los abanicos de la Ópera de Sídney, Sídney, Australia
Fuente: Meteeck & Co (s.f.). Recuperado de: <http://meteeck.com/next-event-presentation-building-sydney-opera-house/>



Figura 2.4. Terminal Municipal de Ómnibus de Eladio Dieste, Salto, Uruguay
Fuente: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República (s.f.). Recuperado de: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/>



Figura 2.5. Hangar de Orvieto de Pier Luigi Nervi, Orvieto, Italia
Fuente: Diedrica. Un blog sobre arte y arquitectura (s.f.). Recuperado de: <http://www.diedrica.com/search/label/Pier%20Luigi%20Nervi>

sus diferentes perspectivas en el edificio. Son combinadas la perspectiva del arquitecto que apunta al diseño arquitectónico y la del ingeniero estructural al concepto. Las ideas espaciales y conceptos materiales del arquitecto y los requerimientos y funciones del usuario, constituyen la información a partir de la cual el ingeniero desarrolla hipótesis estructurales (estructura portante). Así el concepto tridimensional que concibió el ingeniero afecta el diseño espacial del arquitecto y la elección de materiales.

La relación entre iguales puede tomar como ejemplo el trabajo en conjunto entre el ingeniero estructural estonio August Komendant y el arquitecto estonio-estadounidense Louis Kahn. A inicios de 1966, se encarga a Kahn la construcción de una nueva sede para la Fundación de Arte Kimbell (Fig.2.6). Aunque en un principio se le había obligado a construir con la oficina de ingeniería local Preston M. Geren, Kahn acude a Komendant en busca de un concepto estructural para el edificio. Éste último luego de analizar los esquemas estructurales de Kahn (Fig.2.7), le comenta que las cubiertas semicilíndricas de 120 pies de largo por 34 pies de ancho, eran incorrectas porque se habían concebido como elementos que se flexionan en dirección transversal, opuesto a las vigas longitudinales. Por esta razón, Komendant introduce los siguientes cambios aceptados por Kahn: 1) transformación del cascarón—haciéndola de espesor variable—en una bóveda cicloide para un óptimo funcionamiento estructural (Fig.2.8), 2) ensanchamiento de la franja de vidrio entre las paredes y los arcos (Fig.2.8) con respecto al diseño original y 3) rediseño de las paredes como vigas postensadas (Fig.2.6). (Rey Rey, 2016).

Sobre la colaboración que mantendría con Kahn a lo

largo de 18 años, Komendant declararía: “... Lo hice por lo buenas y desafiantes que fueron las ideas de Kahn, y porque el trabajo con él me dio la oportunidad de llevar a cabo mis propios conceptos innovadores” (Komendant, 2000).

2.2 ENSEÑANZA DE ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS

La colaboración entre arquitecto e ingeniero estructural se considera a menudo una contribución fundamental al esquema general de la construcción. Sin embargo, la colaboración entre estas disciplinas durante la fase conceptual continúa siendo difícil de definir.

La necesidad de colaborar surgió a partir de la división de la labor del maestro constructor en diferentes disciplinas, cada una operando dentro de su universo y desarrollando diferentes paradigmas, lenguajes y sistema de actividades. Los ingenieros Hannes Hofmann y Mario Rinke (2018) advierten que, en cuanto al diseño, la ingeniería es un sistema técnico descrito por leyes físicas, mientras que la arquitectura carece un equivalente de la ciencia de la ingeniería, que defina la tarea de diseño. Esto se evidencia en la educación de tipo científico del ingeniero, enfocada en el problema, y en la educación del arquitecto de tipo artístico enfocada en la solución.

Agregan que, en el proceso de diseño arquitectónico, la comprensión del arquitecto de la primera solución propuesta para un problema analizado es constantemente perfeccionada. En el caso del ingeniero, su proceso de diseño es de naturaleza lineal e incluye la descomposición de un problema bien definido en subproblemas que conducen hacia subsoluciones

que crean una solución general. De esta manera, es probable que cuando el arquitecto e ingeniero estructural se involucren en actividades de diseño y solución de problemas, experimenten dificultades como la falta de conocimiento o entendimiento hacia la materia del otro (Hofmann & Rinke, 2018).

En vista de las dificultades de comunicación existentes entre arquitecto e ingeniero, resulta necesario exponer la formación que ha tenido el arquitecto en el campo de las estructuras, para ello, se consideran distintas perspectivas que dan cuenta de la importancia de la enseñanza de las estructuras en la arquitectura.

El ingeniero estructural italiano Mario Salvadori durante su conferencia *Teaching Structures to Architects* (1958) se pronuncia en relación a la enseñanza de las estructuras en la arquitectura en el contexto estadounidense de la década de 1950.

Salvadori consideraba a la arquitectura como una “profesión comprensiva que expresa la entera gama de sentimientos y necesidades de nuestra cultura”. Identificó como primer gran dificultad en la colaboración con el arquitecto—en su obligación para la creación de una *nueva arquitectura*—, el lenguaje común que no compartían las disciplinas.

Para Salvadori, los arquitectos no entendían las estructuras, y una de las razones era la despreocupación respecto al conocimiento estructural impartido en la escuela, donde los estudiantes tenían una idea vaga de la arquitectura, asociándola con la estética y no consideraban apropiado el conocimiento de las matemáticas. Se muestra también crítico respecto a la educación de la época y comenta que, durante los

primeros años de aprendizaje, los estudiantes eran confrontados a la forma y escultura —que no tenían relación alguna con la estructura—, a través de una “muy pequeña estructura” que podía prescindir de la aceleración de la gravedad y podía ser construida de cualquier material. Sin embargo, a medida que las dimensiones de la escultura incrementan, la gravedad condiciona lo que se puede hacer, el factor escala es clave según Salvatori para que los estudiantes eviten “tropezar y soñar con estructuras imposibles” (Salvatori, 1958).

La enseñanza de las estructuras a cargo de los matemáticos para Salvatori no es suficiente, y su interés respecto a las matemáticas debería apuntar hacia “un producto maravilloso de la mente humana con el que se juega”, mas no como una herramienta. De esta manera considera a las materias técnicas como necesarias para llenar el vacío entre la teoría de las matemáticas y el arte.

Estas materias son: la mecánica y la resistencia de materiales y estructuras. Como mínimo estimaba cuatro semestres de matemáticas, cuatro semestres de resistencia de materiales y estructuras, para quienes no estén precisamente interesados en el comportamiento estructural. Sin embargo, considera que cuando el estudiante haya incorporado a su formación matemáticas, mecánica y estructuras, no deberá estar interesado en cálculos de poco valor.

Según Salvatori, aunque no es tarea del arquitecto diseñar vigas, para hacerlo, debe desarrollar una sensibilidad, que alcanza a través del conocimiento por ejemplo de la diferencia entre una viga apoyada sobre dos puntos o una viga apoyada en tres o cuatro puntos,



Figura 2.6. Museo de Arte Kimbell de Louis Isadore Kahn, Fort Worth, Texas, EE. UU.

Fuente: Highsmith, C. M. (1980-2006). Recuperado de: <http://loc.gov/pictures/resource/highsm.13209/>

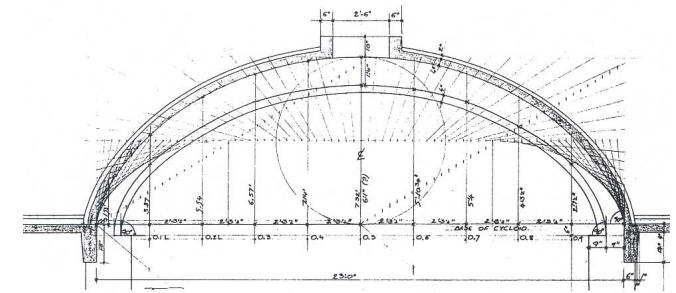


Figura 2.8. Diafragma de pared final del Museo de Arte Kimbell de Louis Isadore Kahn, Fort Worth, Texas, EE. UU.

Fuente: LOTUS 98 - Electa - Rivista trimestrale di architettura (1998). Recuperado de: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/451797/mod_resource/content/1/Nordenson_LineageOfStructure.pdf

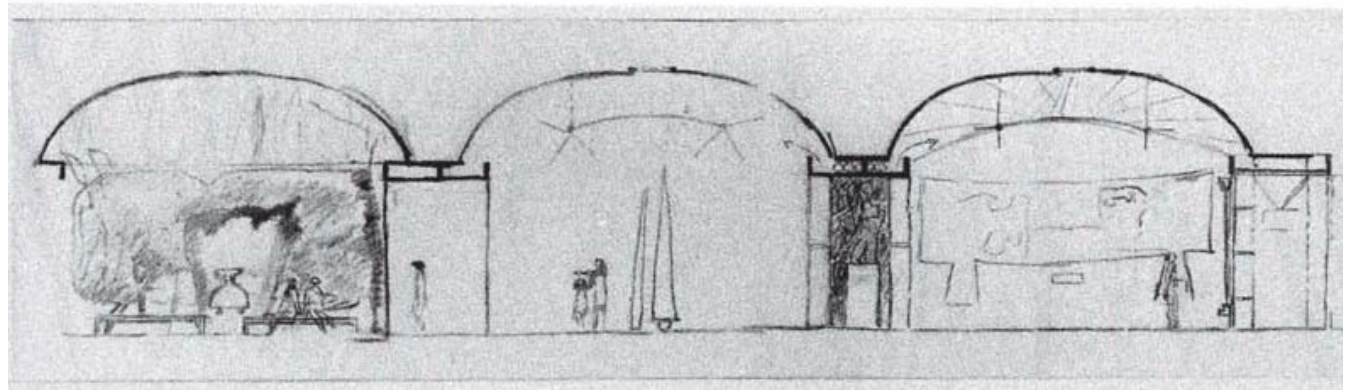


Figura 2.7. Boceto preliminar del Museo de Arte Kimbell de Louis Isadore Kahn, Fort Worth, Texas, EE. UU.

Fuente: LOTUS 98 - Electa - Rivista trimestrale di architettura (1998). Recuperado de: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/451797/mod_resource/content/1/Nordenson_LineageOfStructure.pdf

aunque no debía interesarse en un modelo matemático necesario para obtener los valores de los momentos de las vigas. Arquitectos-ingenieros como Nervi, Candela o Torroja, empezaron estudiando matemáticas a muy temprana edad, y a medida que aprendían cada vez más de esta ciencia, entendían más las estructuras, hasta llegar a un punto en el que su entendimiento era tal que no les era necesario comprobar la sección de sus vigas con las matemáticas. De esta manera, dejaron de lado las matemáticas y siguieron su instinto en la búsqueda del funcionamiento de las estructuras. En relación a si se podría aplicar este conocimiento intuitivo a los arquitectos, Salvadori se mostraba a favor, y creía que era un campo por explorar casi por completo. Constituía un desafío la enseñanza de estructuras teniendo en cuenta que el conocimiento matemático no iba a la par, y este problema se podría solucionar con el uso de un enfoque intuitivo basado en modelos de comportamiento.

En ese momento, Salvadori consideraba la necesidad de desarrollar un programa completo de demostración de modelos de comportamiento estructural, que comience por las ideas más elementales, tensión simple, compresión simple, pasando por la flexión mecánica, pandeo, desde una dimensión hasta tres dimensiones, de manera que se pudiera cubrir gran cantidad de material en poco tiempo. Así, la nueva generación de arquitectos, tendría cierta libertad expresiva necesaria para la emergencia de un nuevo tipo de arquitecto. No obstante, considera que ningún logro arquitectónico “sólido, permanente y sólido” puede ser hecho únicamente por el arquitecto, a menos que esté dispuesto a colaborar con el ingeniero estructural, ingeniero mecánico, ingeniero de suelos y el contratista (Salvadori, 1958).

Algunos años después, en 1961, el ingeniero estadounidense Neal B. Mitchell Jr.—quien consideraba al arquitecto vital en la relación entre arte y ciencia en una incipiente era de computadoras—afirmó que la gente que se encontraba a cargo de los cursos de estructuras no era la indicada, y los mencionados cursos “no apuntaban hacia un completo entendimiento de las estructuras”. Según Mitchell Jr. es innecesario dotar al arquitecto de herramientas de análisis si éste no tiene como referencia el diseño, así el arquitecto se ve obligado a acudir al ingeniero para que éste efectúe el análisis debido a su deficiencia en materia de análisis y “porque poco sabe de diseño” (Mitchell, 1961).

En su texto *A Proposal for a Sequence of Structure Courses* (1961), Mitchell Jr. sostiene que el modelo de enseñanza de estructuras ideal puede alcanzarse mediante la repetición y sofisticación de materias como la estática y resistencia de materiales durante tres años. En el primer año se prioriza el entendimiento y observación hacia las estructuras presentes en la naturaleza y aquellas construidas por el hombre. Para el segundo año se incluyen las matemáticas como herramienta de expresión de los problemas vistos en el primer año en estática y resistencia de materiales. Mitchell Jr. propone el lenguaje matemático como medio para que el estudiante exprese las fuerzas y estructuras. En el tercer año el eje es el diseño arquitectónico que combina ideas del primer año y herramientas matemáticas del segundo, que permitan advertir cuando la estructura se encuentra en condición de falla. Adicionalmente Mitchell Jr. propone un cuarto año para estudiantes interesados donde se trate la problemática de la forma geométrica, procedimientos de construcción y uso de materiales, y un curso de modelos de análisis. La propuesta de estructuras de

Mitchell Jr. orienta a la formación del arquitecto en esta materia, y pretende combinar el diseño y análisis en una nueva disciplina que exige el uso fluido de herramientas. Era consciente que este modelo no estaba próximo a ser implantado, y que básicamente se debía al miedo de las instituciones en acogerlo (Mitchell, 1961).

En 1976, la *Association of the Collegiate Schools of Architecture* (Asociación de Colegios de Arquitectura) de los Estados Unidos, conforma un comité debido a la insatisfacción respecto a la enseñanza de estructuras en las escuelas de arquitectura, que tenía como objetivo la integración de conceptos estructurales al proceso de diseño, y que se consideraba que por aquel entonces los programas de estructuras seguían siendo una derivación de los métodos de enseñanza tradicional de la ingeniería civil. Este tipo de enseñanza según Richard Bender (1976), tendría consecuencias en la formación de los arquitectos, quienes no comprendían principios básicos—física, estática, resistencia de materiales—, no podían aplicarlos o retenerlos por un período significativo luego de su graduación.

Para 1994 muy poco se había avanzado para lograr los objetivos propuestos. Así, los ingenieros estructurales R. Gary Black y Stephen Duff (1994) consideraban que el verdadero propósito de la enseñanza de estructuras debía ser permitir a los estudiantes usar la estructura como una herramienta de diseño en las distintas fases de diseño, para lo que era necesario un conocimiento preciso del comportamiento estructural. Basados en sus experiencias en la Universidad de California en Berkeley, presentaron lineamientos para un nuevo modelo de enseñanza de estructura en la arquitectura, entre los que destacan:

- *El desarrollo de intuición estructural y de criterios ingenieriles debe ser un objetivo concreto.* La intuición en este caso hace referencia a un entendimiento cualitativo del comportamiento estructural, que permite al diseñador evaluar el problema previo al análisis y cálculo.

- *Las estructuras deben enseñarse en el contexto del diseño arquitectónico.* Para el arquitecto es necesario visualizar soluciones estructuralmente viables y apropiadas para su diseño.

- *El entrenamiento del arquitecto en tres dominios interdependientes de la ingeniería.* 1) adquirir conocimiento de sistemas estructurales para comprender cuando utilizarlos; 2) entender conceptos estructurales básicos (estática, mecánica, propiedades materiales, criterios de carga, etc); 3) experimentar comportamiento de estructuras reales y estudiar las relaciones en la estructura entre desplazamientos, rigidez, geometría y fuerzas aplicadas.

- *Estudio del comportamiento global del modelo como punto clave.* El entendimiento del comportamiento general permite al arquitecto integrar estructura y espacio.

- *Estudio detallado de estructuras indeterminadas.* Se debe comprender que un sistema determinado se diferencia de un indeterminado en su comportamiento. En este último, cuando su rigidez es modificada, el flujo de fuerzas se altera y el arquitecto puede controlar las fuerzas, donde reside el potencial creativo.

- *Desarrollar en el pensamiento de los estudiantes lo que simultáneamente ocurre a nivel local (esfuerzos en los elementos) y a nivel global (distribución de fuerzas y deformaciones).*

- *Los cursos impartidos deben ser prácticos y tener un propósito fundamentado en algo real.* Los trabajos de los estudiantes enfocados en tareas reales bien pueden ser un proyecto de diseño o el análisis de un edificio existente, preparándolos para la práctica profesional y forzándolos a utilizar la teoría aprendida de una manera coherente.

A partir de la aparición de modelos de análisis basados en el método de elementos finitos, los educadores de ingeniería estructural y de tecnología de la construcción han buscado la manera de integrar herramientas computacionales y software de análisis estructural en el aprendizaje de la arquitectura. Black & Duff han argumentado que el dominio de estos programas es de gran importancia para futuros trabajos, y además su uso permitiría transmitir e inculcar un nivel de intuición—como el que Salvadori aspiraba—que no permiten métodos convencionales analógicos (Mueller, Fivet & Ochsendorf, 2015).

Los análisis computarizados permiten a los estudiantes comprobar de manera sencilla los modelos digitales estructurales. Para la comprobación es necesario ingresar parámetros del modelo estructural (tipo de articulación, tipo de reacción, sección de los elementos, representación y ubicación de la carga, y la configuración geométrica general). Black y Duff (1994)—que impulsan el uso interactivo del software de análisis estructural—, proponen ejercicios del comportamiento

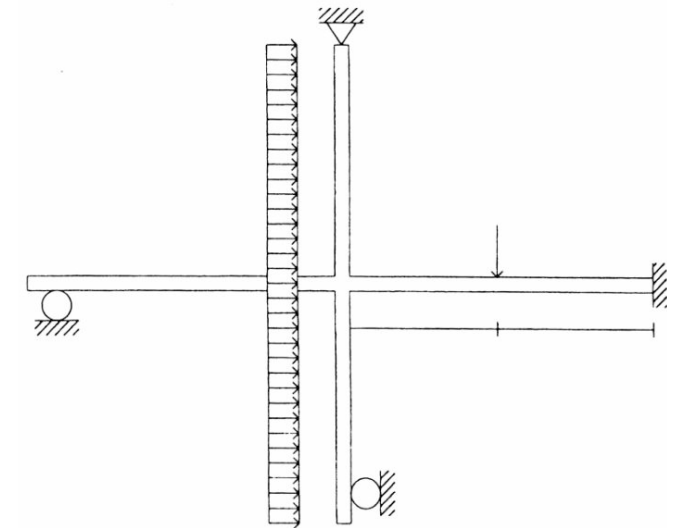
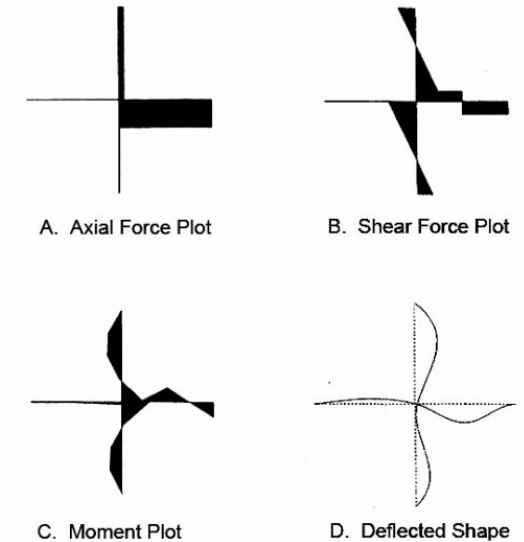


Figura 2.9. Ejemplo de un ejercicio de "ingeniería inversa".
Fuente: Taylor & Francis Online (2013). Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10464883.1994.10734621>

estructural de carácter “reversivo”. En estos ejercicios, a los estudiantes se les provee el análisis parcial de una estructura simple que se presenta en forma de diagramas de carga, cortante, momento y flexión (Fig.2.9), a partir de los cuales consideran relaciones que les permitan revelar la condición original de la estructura; así el modelo computarizado—mediante un proceso de prueba y error—permite comprobar distintas hipótesis (Lonnman, 2007).

Abdelmawla, Elnimeiri & Krawczyk (2000), consideran al arquitecto como “aprendiz visual”, para ello apuntan al desarrollo de módulos de aprendizaje interactivos (Fig.2.10) que examinan “un concepto estructural a la vez”, y observan a las pruebas simuladas como “el mejor enfoque para comprender la ingeniería y el diseño”. En este contexto se proclaman a favor de una “intuición visual”, de manera que el estudiante a través de la visión—que debe desarrollar—, incorpore principios estructurales, a su modo de razonar, tal como Salvadori anhelaba. De esta manera, según los autores, este enfoque “considera tanto una examinación visual como el análisis numérico del componente estructural”.

Para el ingeniero Yopanan Rebello y la arquitecta Maria Leite (2015), el análisis numérico a través de programas computacionales si bien contribuye a agilizar el tiempo del cálculo, el usuario podría perder de vista los procesos matemáticos y lógicos a través de los cuales opera el programa. Rebello & Leite se sitúan en la misma línea de Black & Duff y Salvadori, considerando a los “recursos computacionales” como medio privilegiado para buscar soluciones inventivas y óptimas, además de disminuir el tiempo de trabajo (Rebello & Leite, 2015).

La intuición a la que se refieren los autores está vinculada a los principios que gobiernan el diseño estructural y que según el ingeniero estructural Aurelio Muttoni (2012), no deberían ser excluidos del proceso de diseño, “más aún ahora cuando la precisión del análisis y cálculo estructural han dado lugar a estructuras cada vez más atrevidas y eficientes”. De esta manera el conocimiento de estructuras, beneficiaría al arquitecto como parte de su formación holística, condición que según Rebello (2011) permitiría al arquitecto concebir las estructuras mejor que un ingeniero dada su “posibilidad de síntesis, analogías y metáforas, cosas fundamentales para la creatividad”.

2.3 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS

2.3.1 Estructuras y elementos estructurales

En la ingeniería estructural, un edificio puede ser considerado como una “serie de componentes cuya función es la de transmitir cargas externamente aplicadas a un sistema estructural hacia las fundaciones del edificio” (Engel, 2001). Para comprender esta transferencia de cargas resulta necesario conocer el concepto de “ruta de carga” (Fig.2.11). Éste se refiere a la secuencia de cargas y reacciones entre elementos estructurales (Fig.2.12), que necesita ser identificado en el diseño estructural (Millais, 2017).

Las distintas combinaciones de elementos individuales que configuran la estructura deben resistir las fuerzas impuestas, y de acuerdo al alemán Heino Engel (2001), la transmisión de cargas de estos sistemas (Fig.2.13) puede resumirse en los siguientes mecanismos:

- a) Adaptación a las fuerzas, en donde la transmisión de fuerzas se da a través de la forma.
- b) Subdivisión de las fuerzas, en donde la transmisión de fuerzas acontece mediante vectores.
- c) Confinamiento de las fuerzas, en donde la transmisión de fuerzas ocurre a través del material de la sección (fuerzas seccionales).
- d) Dispersión de las fuerzas, en donde la transmisión de fuerzas se da a través de la superficie.
- e) Recolección y transmisión de las cargas al suelo, en donde el mecanismo actúa en altura.

2.3.1.1 Comportamiento de un sistema de sección activa

Interesa particularmente el tercer grupo (sección activa)—a la que pertenecen las obras a ser analizadas—como mecanismo de resistencia a las fuerzas. Este grupo, comprende prototipos estructurales como: vigas, pórticos, retícula de vigas y losas, sujetos a flexión, esto es, esfuerzos internos de compresión, cortantes y tracción y momentos flectores. Las características principales de este mecanismo son según Engel (2001) la continuidad de masa y el “perfil de sección”.

De acuerdo a Engel (2001), en el mecanismo de sección activa, los elementos lineales determinan ejes y dimensiones—longitud, altura y ancho—en el espacio. La función estructural de estos elementos considera su resistencia a la compresión y tracción que se traduce en barras que funcionan a compresión y tracción respectivamente. Engel agrega que, además pueden usarse como vigas—elemento estructural más utilizado en la construcción de edificios—si tienen rigidez a flexión. Estos últimos elementos además de

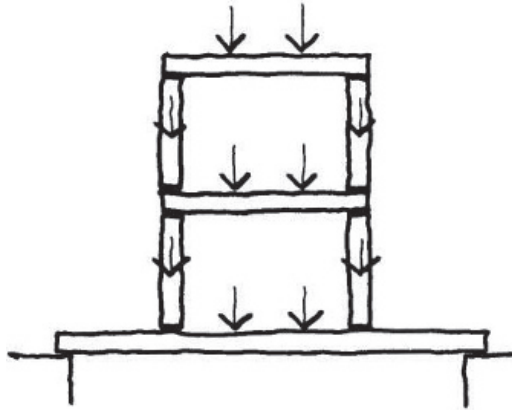


Figura 2.11. Esquema de ruta de cargas de Millais Malcolm, 2017
Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/3515974/d18e21>

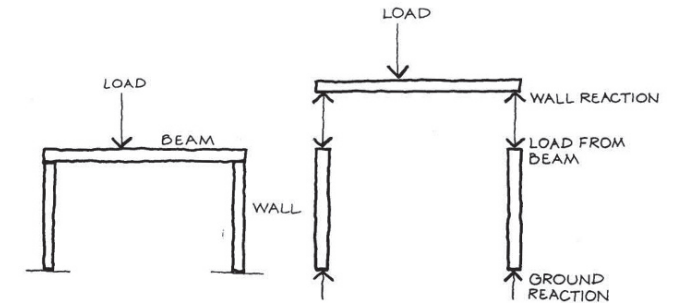


Figura 2.12. Reacciones que la carga de una viga origina sobre paredes de Millais Malcolm, 2017
Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/3515974/d18e21>

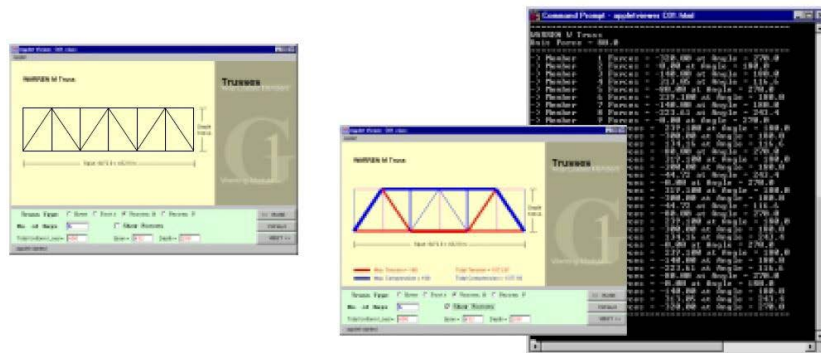


Figura 2.10. Módulo interactivo de aprendizaje *Structural Gizmos*
Fuente: Abdelmawla, S., Elnimeiri, M., & Krawczyk, R. (2000). Recuperado de: <https://mypages.iit.edu/~krawczyk/acadia00.pdf>

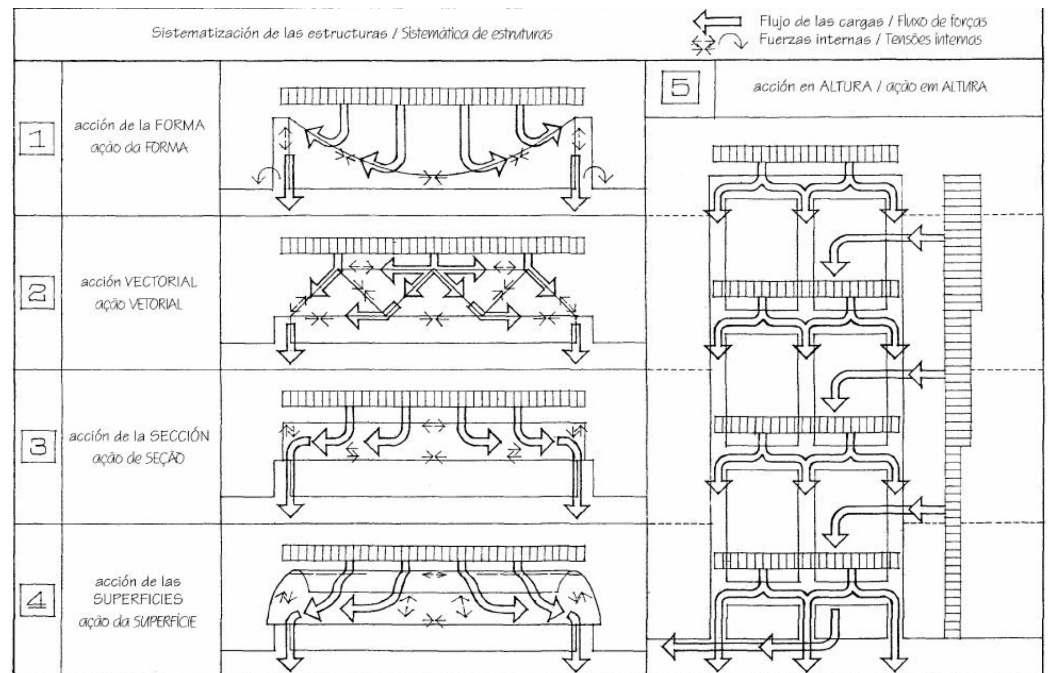


Figura 2.13. Sistematización de estructuras según transmisión de cargas de Heino Engel, 2001
Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/1208725/d44aef>

resistir fuerzas que actúan a lo largo de su eje, resisten fuerzas perpendiculares a su eje y las transmiten lateralmente a través de su eje hasta los extremos.

Los componentes horizontales y verticales por medio de la deflexión de sus ejes, participan del mecanismo de resistencia a deformación, en la que la flexión constituye la característica de “acción portante” de los mecanismos de sección activa. Mecanismo que consiste en la acción combinada de esfuerzos a compresión y tracción, en conjunto con esfuerzos a cortante, es decir, resistencia a flexión (Engel, 2001). La flexión por deformación origina un momento interno de rotación, que equilibra un momento de rotación externo. Adicionalmente, Engel define a los sistemas estructurales de sección activa como “una expresión viva de la lucha por el equilibrio entre momentos de rotación internos y externos de rigidez continua en dos o tres dimensiones”, y comenta que una conexión rígida entre vigas y apoyos, reduce la curva vertical y se establece un mecanismo capaz de resistir fuerzas horizontales.

2.3.2 Conceptos básicos

2.3.2.1 Fuerza

En la teoría estructural, la fuerza se representa por un vector, que es definido en sentido matemático por su dirección e intensidad y se precisa su punto de aplicación. Cuando las fuerzas se originan al interior de un elemento de soporte, resulta fundamental conocer la posición exacta de la fuerza. Así, la fuerza está determinada por: dirección, intensidad y punto de aplicación.

Es necesario también hacer la distinción, entre dirección y sentido. Mientras la dirección es definida por una línea recta, el sentido determina la orientación del vector fuerza en esa línea. La dirección en un “sentido vectorial” está definida entre un ángulo de 0° a 360° desde un eje de referencia (Schwartz, 2011).

Una de las primeras fuerzas que se considera actúan sobre una estructura portante son las fuerzas gravitacionales, a la que se denominan cargas. Para todos los cuerpos que descansan sobre la superficie de la tierra la gravedad es de $9,81 \text{ m/s}^2$ (aceleración de la tierra). Al expresarse las fuerzas en Newton, a un objeto de 1 kg de masa le corresponde una carga de 9,81 N en el Sistema Internacional de Unidades (SI).

2.3.2.1.1 Clasificación de las fuerzas

Las fuerzas externas actúan en un miembro estructural en dos sentidos: axial y perpendicular. En el primer caso la carga es paralela a la longitud del miembro y por lo general induce fuerzas de compresión o tracción dentro del mismo. En el caso de las cargas perpendiculares, éstas actúan perpendicular a la dirección del miembro, y provocando en el mismo fuerzas cortantes, a torsión y flexión de acuerdo a la geometría del miembro y punto de aplicación (Silver, McLean & Evans, 2013).

La siguiente clasificación de Muttoni (2012) de fuerzas externas (cargas) de acuerdo a su actuación sobre la estructura, puede ser condensada en dos grupos. Mientras las dos primeras son ocasionadas principalmente por fuerzas gravitatorias, las otras dos no.

1. Cargas permanentes o carga muerta (peso propio de

la estructura y elementos no estructurales);

2. Cargas variables o carga viva (peso de las personas, muebles, etc);

3. Empuje del viento;

4. Fuerzas inerciales derivadas de aceleraciones en masa (p. ej. terremotos).

2.3.2.2 Momento

Según Engel (2001), un momento es “el movimiento de giro que origina un par de fuerzas o una fuerza cuyo punto de giro no coincide con la dirección de la fuerza”. De este modo, el momento es igual al producto de la fuerza por el brazo de momento (distancia a que se encuentra el punto de giro respecto al punto de aplicación de la fuerza).

2.3.2.3 Condiciones de equilibrio

Para que exista equilibrio, es necesario que las fuerzas actuantes cumplan las siguientes condiciones:

- Tener la misma intensidad;
- Estar dirección opuesta;
- Coincidir en la misma línea de acción

Si se cumplen las dos primeras condiciones, puede resumirse en una condición equivalente: las dos fuerzas deben cancelarse entre sí vectorialmente (Muttoni, 2012). Para que se cumpla el equilibrio estático, por tanto, la sumatoria de fuerzas (horizontales y verticales) y también de momentos, debe ser igual a cero.

Si la estructura cumple con las ecuaciones de equilibrio estático, se trata de una estructura isostática o estáticamente determinada (Matheson, 1971),

mientras que, cuando existen más variables que ecuaciones de equilibrio, no es posible determinar fuerzas internas y reacciones, y dicha estructura se clasifica como estructura estáticamente indeterminada o hiperestática (Carpinteri, 1997). En este último caso para su solución, se requiere: información relativa a las propiedades materiales y ecuaciones de compatibilidad para el cálculo de desplazamientos.

2.3.2.4 Grados de libertad

Bandyopadhyay (s.f.), define a los grados de libertad—en un sistema mecánico—como el número mínimo de variables independientes necesarias para describir la totalidad del sistema. Un sistema se denomina “rígido sin restricciones”, cuando han sido identificados seis grados de libertad, clasificados en tres rotacionales y tres traslacionales (Layton, 1999). Esto quiere decir que el cuerpo es libre de moverse a lo largo de los ejes perpendiculares “X”, “Y” y “Z”, y cambiar de orientación al rotar alrededor de los mismos.

2.3.2.5 Rigidez

Según el ingeniero civil Ji (2003), la rigidez de una estructura es la “habilidad estructural de resistir a la deformación”. Considera además que, esta habilidad puede ser evaluada “cuantitativamente” como la relación entre la carga aplicada y la deformación estructural. Sin embargo, para Ji si se piensa a la estructura en términos de rigidez, su concepto debería definirse como la “eficiencia estructural para transmitir las cargas aplicadas a los soportes”. Ji considera que, si se siguen los siguientes conceptos, una estructura puede ser considerada como rígida: 1) mientras las rutas de carga internas sean más directas; 2) mientras

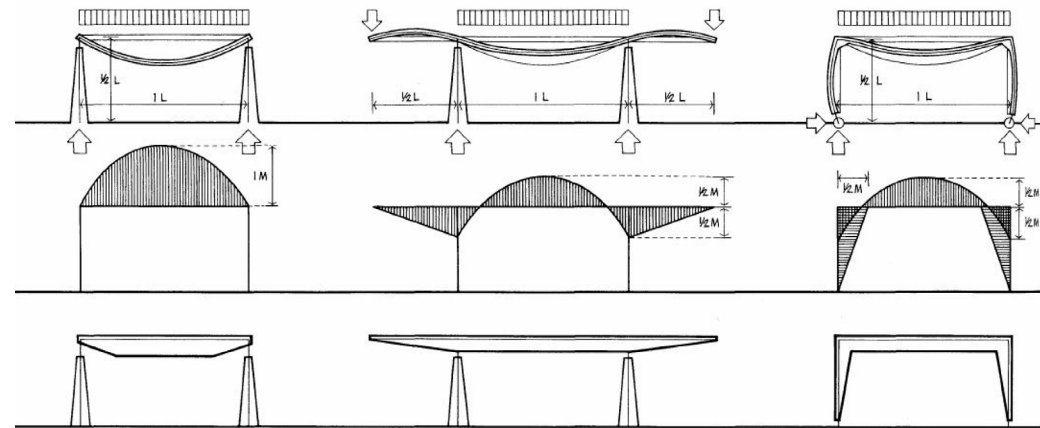


Figura 2.14. Mecanismo de pórtico y su relación con la viga de Heino Engel, 2001

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/1208725/d44aef>

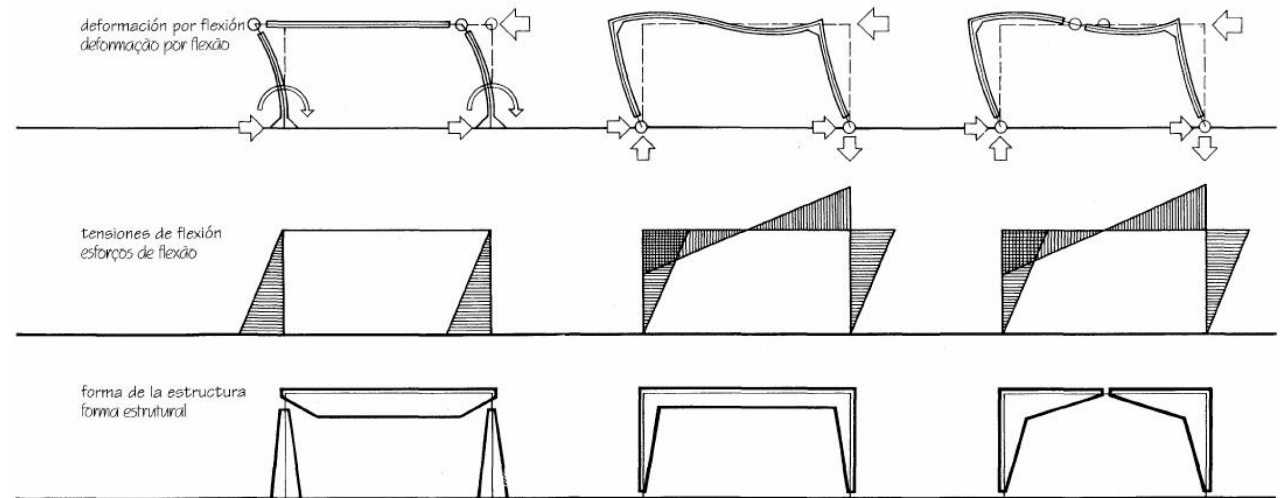


Figura 2.15. Mecanismo resistente frente a cargas laterales de Heino Engel, 2001

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/1208725/d44aef>

la distribución de fuerzas internas sea más uniforme; 3) mientras las fuerzas internas sean menores.

2.3.3 Propiedades del sistema estructural

El comportamiento de las estructuras requiere también de un aproximamiento a través del estudio del comportamiento en su rango elástico. Esto es, un análisis que considera a los materiales que constituyen la estructura de modo tal que, luego de la aplicación de una fuerza externa, vuelven a su forma original (Landau & Lifshitz, 1970).

Una vez que el apartado anterior se abordaron las condiciones de equilibrio—imprescindible para la resolución de este problema—desde la rama de la estática, es necesario además considerar las propiedades del sistema estructural.

2.3.3.1 Propiedades geométricas

Las propiedades geométricas constituyen una de las cualidades del objeto, necesarias para el análisis estructural, más aún si se considera que el grupo al que pertenecen las obras a analizar, transmite fuerzas a través de su sección. De aquí, según Engel (2001), la importancia de la consideración de su geometría al momento de proyectar en función del material utilizado.

La geometría hace referencia a la intersección de los distintos planos que componen la sección, además de la forma de la estructura, que, en función de su arreglo, es posible una lectura del comportamiento de los elementos lo componen como es el caso de los sistemas de pórticos (Fig.2.14 y Fig.2.15).

Asimismo, a partir de estas propiedades, es posible realizar una interpretación de los elementos que configuran sistemas estructurales. Por ejemplo, en un sistema de retícula de vigas (Fig.2.16), de existir una viga que atravesase un sistema de vigas paralelas, existe una transmisión de cargas hacia todos los elementos de la estructura (biaxial), cuando están sujetos a cargas puntuales. Adicionalmente Engel señala que, ante dos vigas de igual sección, la de menor longitud será aquella que soporte mayor carga debido a su mayor rigidez (Fig.2.17).

2.3.3.1.1 Propiedades seccionales

Las propiedades seccionales son independientes de la resistencia del material y están relacionadas a la forma de la sección. A través de su uso en el análisis y diseño estructural, se comprende de mejor manera la eficiencia de ciertas formas—en función de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos—cuando estas son sometidas a carga. Estas propiedades incluyen:

a) Centro de área o centroide. Mientras el centro de gravedad de un sólido se considera al punto en el que concentra su peso se concentra, el centroide—centro de gravedad de la figura—es utilizado como referencia de varias propiedades geométricas en áreas planas (Ambrose & Tripeny, 2016).

b) Segundo momento de área o momento de inercia. El momento de inercia es, según Blinder (2013), “una medida de la resistencia de una figura al cambio en su movimiento de rotación”. Debe ser especificado el eje con respecto al cual rota, de modo que, de acuerdo a Ambrose & Tripeny (2016), se puede utilizar el eje centroidal—más empleado—o un eje específico, para

así posteriormente determinar esfuerzos y deformación por flexión.

c) Módulo resistente. Dentro de esta propiedad interesa el módulo resistente elástico (momento de inercia en “ Z ”), de importancia en el diseño de elementos lineales como vigas, y que permite evaluar la resistencia de la viga. Parte de la premisa que, al trabajar a flexión estos elementos, son las fibras de los extremos superiores e inferiores, que medidas respecto a un punto (p.ej. centroide). permitirán encontrar los esfuerzos máximos que ocasionarían su fracaso (RMIT University, s.f.).

d) Radio de giro. Indica la rigidez de una sección en función de la forma de su sección transversal en elementos a compresión. Se utiliza para comparar el comportamiento de distintas formas estructurales a lo largo de su eje. Para efecto de cálculo se utiliza el menor radio de giro, es decir en el plano más delgado, susceptible a pandeo (RMIT University, s.f.).

2.3.3.2 Propiedades mecánicas (elásticas)

En el comportamiento de las edificaciones bajo carga, la pertinencia del material se determina según sus propiedades mecánicas, como la elasticidad, plasticidad, dureza, maleabilidad, entre otras. En el presente es de interés el primero—debido a que las obras a ser analizadas fueron construidas en hormigón.

Para que un material se comporte elásticamente, luego de ser deformado por cargas, regresa a su forma original, cuando éstas han sido removidas, siendo de este modo, el comportamiento elástico importante en el diseño estructural (RMIT University, s.f.).

2.3.3.2.1 Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

El grado de deformación que un material puede experimentar antes de fracasar lo determina como “frágil” o “dúctil”. Aquellos materiales que fallan antes de presentar una deformación del 5 por ciento se clasifican como “frágiles” como son el concreto, madera, vidrio y cerámica. Mientras materiales que se deforman de manera significativa previo a su falla, son considerados como dúctiles, como los son el acero y aluminio (Moro, 2019).

La deformación a la que un material es sometido producto de fuerzas a tracción, compresión o cortante, depende de la manera como la carga es aplicada. La deformación es resultado de la relación entre el alargamiento unitario bajo carga y la dimensión original del material. Diferentes deformaciones comprenden: lineal—conocida como módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal—, volumétrica, cortante (Moro, 2019).

Para Hearn (1997), el módulo de elasticidad dentro de los límites elásticos que establece la ley de Hooke, se muestra como una constante que calcula la rigidez y expresa la relación entre esfuerzo y deformación.

En el caso de la deformación volumétrica, es el coeficiente de Poisson la constante que relaciona los cambios en la dimensión del material—cuando este es estirado y su sección transversal cambia al igual que su longitud—, es decir, la razón entre la deformación transversal y la elongación longitudinal (Rosato & Rosato, 2003).

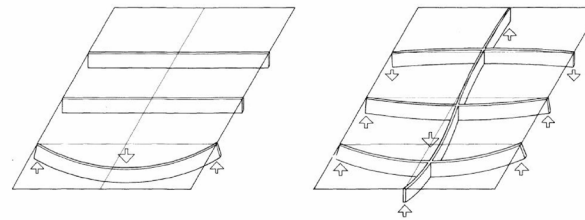


Figura 2.16. Relación entre vigas paralelas aisladas y retícula de vigas de Heino Engel, 2001

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/1208725/d44aef>

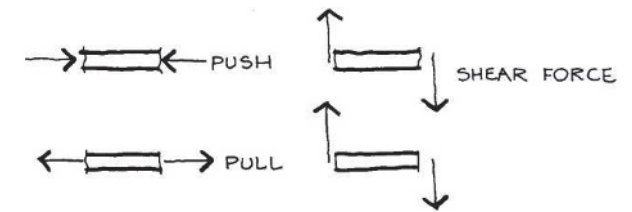


Figura 2.17. Dirección de fuerzas que ocasionan esfuerzos normales y a cortante de Millais Malcolm, 2017

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/3515974/d18e21>

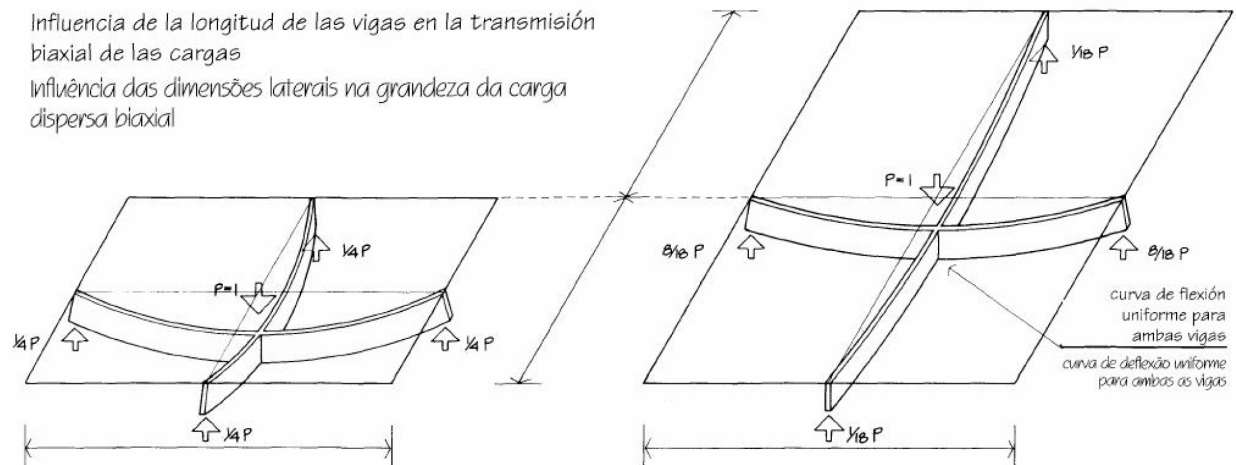


Figura 2.18. Influencia de la longitud de las vigas en la transmisión biaxial de cargas de Heino Engel, 2001

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/1208725/d44aef>

2.3.4 Requisitos de resistencia, rigidez y estabilidad

2.3.4.1 Esfuerzo (tensión mecánica)

El esfuerzo es la medida de la intensidad de las fuerzas internas inducidas por cargas, y se expresa como fuerza por unidad de área. A medida que la carga aumenta, las fuerzas y esfuerzos internos incrementan hasta alcanzar el límite más allá del cual fracasa la estructura. Este estado límite se puede determinar de dos maneras: deformación—límite a partir del cual el material deja de comportarse de manera elástica—y la tensión de rotura—tensión más allá de la cual el material falla al ser traccionado (Moro, 2019).

Según el arquitecto José Luis Moro (2019), en un elemento estructural, existen dos tipos de esfuerzos que pueden ser provocados: “esfuerzo directo o normal” y “esfuerzo a cortante”. En el primero las fuerzas son aplicadas axialmente, y el esfuerzo se calcula como la fuerza aplicada dividida por el área de la sección transversal perpendicular a la dirección de la carga (Fig.2.17). En el segundo las cargas—perpendiculares a su eje longitudinal—generan esfuerzos en la sección en dirección paralela a la carga (Fig.2.18).

En el caso de las cargas que producen flexión, los esfuerzos varían a lo largo de la sección transversal del elemento. Así, el elemento en los extremos experimenta simultáneamente los esfuerzos más elevados de tracción y compresión, mientras que a medida que se aproxima a la mitad, estos esfuerzos tienden a cero. Este esfuerzo que provoca la flexión se calcula al dividir el momento flector aplicado para el módulo resistente de la viga.

2.3.4.2 Desplazamientos

Los desplazamientos aparecen en la estructura a partir de cargas exteriores que deforman la estructura, y se encuentran relacionados a los grados de libertad, razón por la cual la identificación de estas variables resulta importante en la solución del problema.

Para el cálculo de desplazamientos de estructuras complejas—adecuado para análisis computarizados—que incluye a estructuras estáticamente indeterminadas, se emplea la matriz de rigidez. Ésta requiere de ecuaciones de equilibrio de los nodos en relación a sus desplazamientos y el vector fuerza producido por unidades de desplazamiento (Leet & Huang, 2005).

2.3.5 Análisis dinámico

De acuerdo a Clough & Penzien (2003), cuando una estructura dada está sujeta a una carga dinámica arbitraria, es posible analizarla en términos de esfuerzos y deflexiones a través de distintos métodos, en los que la carga estática debe ser vista como un tipo de carga dinámica.

De este modo, el término dinámica, es definido por los autores como "variable en el tiempo", siendo así la carga dinámica de cualquier magnitud, dirección, y/o posición, variable en el tiempo, al igual que la respuesta estructural como los esfuerzos y deflexiones resultantes.

En relación a problemas estáticos y dinámicos distinguen que, el factor tiempo es el que determina que en un problema dinámico no exista una solución como ocurre en un problema estático, por lo que es necesario

establecer una sucesión de soluciones a todos los momentos de interés en el historial de respuestas.

2.3.5.1 Análisis modal

En la ingeniería estructural, el análisis modal emplea la masa y la rigidez de la estructura para encontrar los distintos períodos en los cuales la estructura resuena y falla si las frecuencias de su excitación coinciden con las frecuencias naturales—frecuencias en las que un sistema es propenso a vibrar—de la estructura (Chopra, 2012).

La masa modal requerida, según Cacho-Pérez, Frechilla & Lorenzana (2017) se encuentra relacionada con la distribución de la masa y los modos de vibrar. Son precisamente los modos de vibrar los que permiten simular la respuesta de un elemento y predecir su comportamiento dinámico en condiciones normales o excepcionales (sismo).

El modelo resultante de este análisis constituye, además, según Døssing & Brüel & Kjær (Firm) (1988) una “herramienta poderosa con la cual podemos investigar los efectos de modificaciones estructurales, o predecir como la estructura se desempeñará bajo modificaciones”.

2.3.5.1.1 Vibración

De acuerdo a Chopra (2012), la *libre vibración* en una estructura se inicia cuando ésta es perturbada de su posición estática de equilibrio al impartir a la masa tanto desplazamiento como velocidad en el tiempo cero (instante en el que se inicia el movimiento), y se le permite a la estructura vibrar sin ninguna excitación

dinámica externa.

Døssing & Brüel&Kjær (1988) agregan además que, el desplazamiento físico actual—cuya representación reproduce desplazamientos relativos de cada parte de la estructura según modos específicos—, será una combinación de todos los modos de vibrar presentes en la estructura y consideran además al modo de vibrar como una propiedad que es propia de la dinámica de una estructura en *libre vibración*.

Durante la libre vibración se conoce como *periodo natural de vibración* al tiempo requerido para un ciclo de movimiento armónico en cada uno de los modos naturales—desviación característica de la forma en un sistema de múltiples grados de libertad. Las diferentes partes del sistema se mueven en conjunto en la misma frecuencia de manera sinusoidal y sus amplitudes aumentan o disminuyen proporcionalmente entre sí.

2.3.5.1.2 Amortiguamiento

De acuerdo a Chopra (2012), además de la inercia, la amortiguación a las fuerzas de resistencia elástica y la dependencia del tiempo de todas estas cantidades de fuerza, complejizan la solución de un problema típico de dinámica estructural si se lo compara con un problema estático. Es así que define al amortiguamiento, la masa y las propiedades elásticas (flexibilidad o rigidez) como propiedades físicas esenciales en un sistema estructural elástico lineal o mecánico que está sujeto a un medio de excitación externo o carga dinámica.

El término amortiguamiento, según Chopra (2012) se utiliza para describir el medio por el cual se reducen las amplitudes de oscilación mediante la eliminación

irreversible de la energía vibratoria en un sistema mecánico o en un componente.

Hagedorn & Spelsberg-Korspete (2014) definen a la amortiguación como un resultado clave para predecir la respuesta a la vibración de las estructuras, donde la misma es más obvia en la resonancia donde las fuerzas de rigidez e inercia se igualan. Como resultado, el amortiguamiento es un factor clave para predecir la respuesta a la vibración de las estructuras. Añaden que, interesan las fuerzas de amortiguamiento para la formulación de ecuaciones de movimiento en estructuras junto con otros dos tipos de fuerzas como las fuerzas de inercias y fuerzas elásticas.

En relación a las tasas de amortiguamiento modal para una estructura, Chopra (2012) considera que, si bien deberían ser estimadas usando información similar al de las estructuras, es común que esta información está basada en registros de movimientos sísmicos, por lo que debe ser usada a discreción. Añade además que, aquella información útil es aquella que haya sacudido a la estructura pero que no se han deformado en su rango inelástico. En el presente caso, se ha considerado para el análisis del desempeño estructural una tasa de amortiguamiento crítico de 5%—implícito en los espectros que se emplean.

2.3.5.2 Análisis espectral

De acuerdo a Chopra (2012), la respuesta de una estructura al movimiento del suelo producto de un terremoto, constituye una de las aplicaciones más importantes en el campo de la teoría de la dinámica estructural, en el que interesan de manera particular en el presente, los sistemas lineales, es decir elásticos.

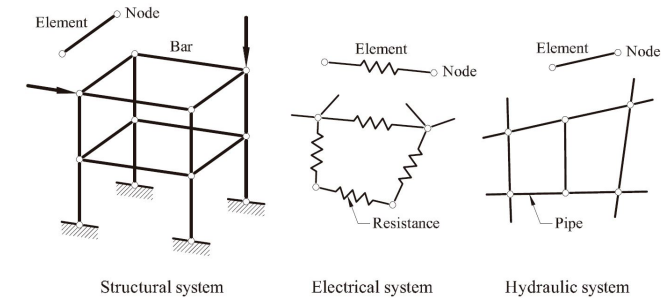


Figura 2.19. Sistemas discretos. Eugenio Oñate, 2009

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/863941/21fa72>

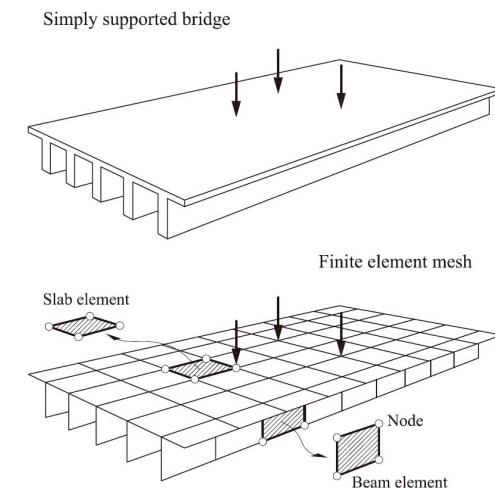


Figura 2.20. Estructura continua de un puente simplemente apoyado y su discretización. Eugenio Oñate, 2009

Fuente: Z-Library (2020). Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/863941/21fa72>

A este movimiento del suelo—medido a partir de un acelerógrafo—, lo define Chopra como “la variación en el tiempo de la aceleración del suelo”. Es así que, en el caso de conocer tanto la masa como la rigidez de un sistema, a partir de la aceleración del suelo, es posible resolver el mismo. Chopra (2012) añade que, debido a que la aceleración del suelo varía de manera irregular, es necesario emplear métodos numéricos para determinar el espectro de respuesta.

Chopra agrega que, el concepto de espectro de respuesta provee un medio conveniente para resumir la respuesta máxima de todos los sistemas lineales a un componente particular del movimiento del suelo, del mismo modo que permite la aplicación del conocimiento de la dinámica estructural para el diseño de estructuras y el desarrollo de requisitos de fuerza lateral en los códigos de construcción. Indica además que, el espectro de respuesta se muestra como la gráfica del valor pico una cantidad de respuesta de una función de un periodo natural de vibración de un sistema.

Adicionalmente, a partir del espectro elástico de respuesta, es posible calcular la deriva de piso, parámetro que permite relacionar los desplazamientos laterales máximos en el tope del edificio consecuencia de la cortante lateral sísmica y fuerza lateral sísmica (Ishiyama, 2011) dividido por la altura total del edificio. De acuerdo la norma *NEC-SE-DS* (2014), la deriva máxima no será mayor al 2% de la altura de piso en estructuras de hormigón armado.

2.4 MÉTODO DE ANÁLISIS

Para la comprensión del comportamiento de las estructuras, es necesario entender los fundamentos

matemáticos, siendo según Millais (2017), éste “mundo” accesible a través del cálculo diferencial.

El análisis numérico es el estudio de algoritmos—conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema (Real Academia Española, s.f., definición 1)—que utilizan la aproximación numérica para programas de análisis matemático.

Según el matemático estadounidense Francis B. Hildebrand (1974), el “fin último” del análisis numérico, es ofrecer métodos adecuados para obtener soluciones útiles a problemas matemáticos—formulados en términos de una ecuación algebraica, ecuación diferencial ordinaria o parcial, así como para “extraer información útil de soluciones disponibles que no se expresan en formas manejables”.

2.4.1 Método de Elementos Finitos

En relación a esta definición de análisis numérico, coincide el español Eugenio Oñate (2009) con Hildebrand (1974), y agrega además que, es el Método de los Elementos Finitos (MEF) el que rige los problemas que en la naturaleza se encuentran. De acuerdo a Oñate, la estrategia que sigue este método—al igual que la mayoría de métodos numéricos—es la de transformar las expresiones matemáticas en una serie de ecuaciones algebraicas que dependen de un conjunto de parámetros finitos.

Considera además que, cuando de análisis estructural se trata, el procedimiento es inseparable de las matemáticas, el modelado y ciencias de la computación. Es esta última la que para el ingeniero

civil alemán Klaus-Jürgen Bathe (2014), ha permitido a través del uso de computadoras digitales, que el proceso que requiere la resolución de las ecuaciones pueda ser llevado a cabo de manera efectiva. De esta manera, este método se establece como una “poderosa herramienta” para el cálculo de desplazamientos, esfuerzos y deformaciones a la que una estructura se enfrenta cuando es sujeta a un análisis estructural.

El principal análisis que el MEF posibilita en el campo de la ingeniería, es de tipo estructural que permita comprobar la resistencia de edificaciones existentes y optimizar el diseño de futuras edificaciones, a través de una aproximación a la solución exacta (Oñate, 2009).

2.4.2 Definición de elemento finito

Un elemento finito puede ser explicado según Oñate como una pequeña porción de un sólido o estructura, que al definirse como dominios (regiones) que no se superponen y al articularse, constituyen la geometría de la estructura. Estos elementos pueden ser representados como triángulos y cuadriláteros bidimensionalmente, y tetraedros y hexaedros tridimensionalmente (Oñate, 2009).

2.4.3 Procedimiento para el análisis del Método de Elementos Finitos

2.4.3.1 Clasificación del problema

2.4.3.1.1 Modelo conceptual de la estructura

De acuerdo a Bathe (2014), el problema físico que se resuelve mediante el MEF, considera a la estructura o componentes estructurales que se encuentran sujetos

a carga. Este problema físico necesita traducirse a un modelo “idealizado”, que represente de manera precisa la geometría de la estructura y que, según Oñate (2009), prescinda de “detalles superfluos” e incluya características relevantes que permitan describir con precisión la estructura real (construida o diseñada).

2.4.3.1.2 Modelo matemático o estructural

Una vez definido el modelo conceptual, se determina el modelo matemático o estructural a utilizar, en este caso el *MEF*. De acuerdo a Oñate (2009), la aplicación de este modelo requiere la implementación de un código de computadora. Éste debe proveer al modelo matemático de una *descripción geométrica* (puntos, líneas, superficies), una *expresión matemática* de las principales leyes físicas que gobiernan el comportamiento de una estructura (ecuaciones de equilibrio y condiciones de frontera) y las *propiedades materiales y cargas* que actúan sobre la estructura (Bathe, 2014). El modelo resultante se encuentra en la forma de matrices de masa y rigidez.

En relación a su geometría, pueden distinguirse sistemas discretos (Fig.2.19) y continuos (Fig.2.20). Serán examinados en el estudio de casos del presente, estos últimos, que son analizados como sistemas discretos a partir del proceso de discretización, que matemáticamente se expresa por medio de ecuaciones diferenciales, que deben satisfacerse en cada nodo del sistema (Oñate,2013).

Según Oñate (2009), una vez que el modelo matemático ha sido resuelto con precisión y sus resultados interpretados, podría optarse por un modelo matemático “refinado” que permita comprender de

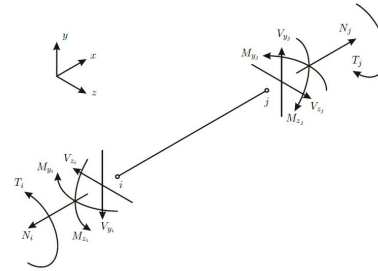


Figura 2.21. Convención de una viga en sus coordenadas locales
Fuente: StaBIL (2014). Recuperado de: Cortesía Ing. Hernán García

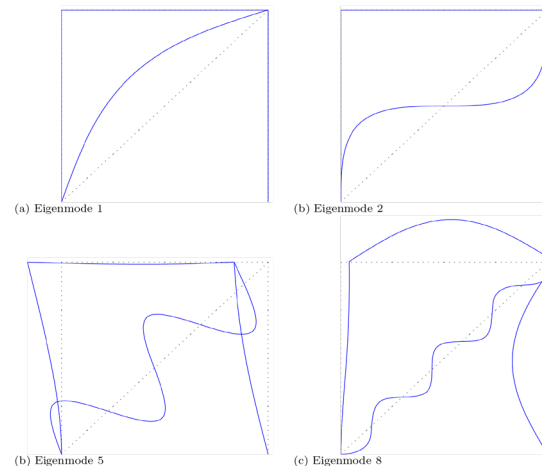


Figura 2.23. Modos de vibrar de un pórtico
Fuente: StaBIL (2014). Recuperado de: Cortesía Ing. Hernán García

$$\begin{aligned}
 & \text{global: } i \quad m \\
 & \text{local: } 1 \quad 2 \\
 & \mathbf{K}^{(e)} = \mathbf{k}^{(e)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 & i \\ 2 & m \end{matrix}, \quad \mathbf{k}^{(e)} = \left(\frac{EA}{l} \right)^{(e)}, \quad \mathbf{f}^{(e)} = \begin{Bmatrix} f_{x1}^{(e)} \\ f_{x2}^{(e)} \end{Bmatrix} \begin{matrix} 1 & i \\ 2 & m \end{matrix} \\
 & \begin{bmatrix} i & m \\ i & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -[k^{(e)}] & -[k^{(e)}] \\ -[k^{(e)}] & -[k^{(e)}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x1}^{(e)} + p_{x1} \\ f_{x2}^{(e)} + p_{xm} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Figura 2.22. Contribuciones de una barra individual a la matriz global de rigidez y al vector global de fuerza
Fuente: StaBIL (2014). Recuperado de: Cortesía Ing. Hernán García

mejor manera el problema físico. De esta manera, es un aspecto fundamental la elección de un modelo matemático adecuado, el que según Bathe, debe presentar las características de “confiable” y “efectivo” al momento de predecir la información buscada.

Se considera “confiable” cuando la respuesta requerida es predecida dentro de un nivel de precisión respuesta al modelo matemático, y “efectivo” cuando genera una respuesta lo suficientemente precisa y a un menor costo—costo computacional asociado a elementos más sofisticados y que comprende el tiempo de ejecución del programa informático y el tiempo destinado a la interpretación de resultados.

2.4.3.2 Solución en MATLAB vía StaBIL

MATLAB es un software comercial propiedad de la corporación *The MathWorks, Inc.*, EE.UU. Es un sistema de cómputo numérico con un lenguaje de programación, que comprende interfaces gráficas y una serie de herramientas especializadas (Ferreira, 2009).

El siguiente proceso de solución del *MEF*, considera las posibilidades que ofrece un complemento de *MATLAB*. Se trata de StaBIL, en su versión 3.0, del año 2014, que fue desarrollado por el “Área de Mecánica Estructural” del “Departamento de Ingeniería Civil” de la KU Leuven (Bélgica), y que constituye el material de curso que está siendo utilizado dentro la cátedra de “Dinámica de Estructuras” de dicha universidad (Dooms et al., 2014).

De acuerdo al ingeniero civil portugués A.J.M Ferreira (2009), en un problema de elementos finitos se puede considerar los siguientes pasos:

2.4.3.2.1 Pre-proceso

a) Definir los elementos conectados en los nodos

Consiste en dividir el objeto a analizar, en elementos que contengan los nodos—que posicionan al elemento en el espacio según coordenadas globales en “X”, “Y” y “Z”—, y definir la forma—por lo general cuadriláteros— de estos elementos. A esta serie de elementos y nodos se denomina “malla de elementos finitos”, en la que cada elemento que la constituye puede tener distinta dimensión e inclinación, pudiéndose tratar de elementos planos en 2D junto con elementos en forma de “varas” en 1d (Pepper & Heinrich, 2017).

Este proceso de dividir la geometría de una estructura en una “malla de elementos finitos”, se conoce como discretización—que considera por ej. tipo de elemento y tamaño de mallado—, y resulta esencial en la etapa de pre-proceso, y que proporciona información fundamental del sistema estructural.

b) Ingresar de datos

Una vez que en la instancia anterior ya han sido definidos los elementos del modelo, pudiendo ser estos unidimensionales o bidimensionales, es necesario asignar una nomenclatura a cada uno. En el caso de los elementos lineales les corresponde el tipo 1 o *beam*, mientras que los elementos bidimensionales son tipo 2 o *shell4*. Mientras tanto, para los nodos y elementos, se necesita también codificarlos para su identificación.

La información relativa a las propiedades geométricas necesarias considera el espesor, en el caso de elementos bidimensionales, mientras que, en caso

de requerir elementos unidimensionales, la sección de los mismos precisa el ingreso de las propiedades geométricas: área y momentos de inercia. Para estos últimos elementos se considera las coordenadas locales de cada miembro.

En relación a la materialidad, ésta necesita de parámetros como el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson (ν) y la densidad (ρ), que serán debidamente codificados. Aquí, basta que uno de estos elementos cambie en su valor, para que sea definido como un nuevo material. Es posible que, en virtud de una simplificación en la solución, en elementos como losas, que además de su densidad material, soportan cargas vivas y muertas, exista una combinación de las mismas.

Luego de que esta información ha sido ingresada, resta por definir las condiciones de frontera. Para ello, es necesario ubicar de entre todos los nodos del modelo, aquellos que restringen el movimiento del sistema estructural, para lo que es necesario tener un conocimiento previo acerca de cómo fue construida la obra. Así, por ejemplo, nodos empotrados están restringidos de movimiento y rotación en todas las direcciones.

2.4.3.2.2 Proceso

a) Calcular la matriz de rigidez $k^{(e)}$ y el vector de cargas $f^{(e)}$ para cada elemento

Los sistemas discretos expuestos anteriormente, se estudian mediante la implementación del Método Matricial de Rigidez, que provee una metodología general para la aplicación del MEF (Oñate, 2009).

Este método de cálculo depende de la geometría del elemento y sus propiedades mecánicas, esto es, las coordenadas de los nodos, el tipo de elemento, su sección, materialidad y grados de libertad.

Oñate (2013) define como matriz de rigidez, a la serie de números organizados en filas y columnas que relaciona los desplazamientos con las cargas actuantes, “representando al sistema de ecuaciones lineales que deben resolverse para determinar una solución aproximada a la ecuación diferencial”. La función que se utiliza para la solución de la matriz convierte al modelo en un elemento finito que asume las propiedades ingresadas en el pre-proceso.

De acuerdo a Leet & Huang (2005), los elementos de una matriz de rigidez, en cada miembro se expresa en un sistema de coordenadas locales, en el que el eje x' es colinear al eje longitudinal del miembro. De este modo es posible posteriormente, superponer a cada miembro para determinar la Matriz Global de Rigidez, es decir, de la totalidad de la estructura.

b) Ensamblar la matriz global de rigidez $KU=F$ y matriz de masa M

El sistema global de ecuaciones $KU = F$, se obtiene a partir de ensamblar las aportaciones de cada elemento a la matriz global de rigidez K y al vector de fuerza nodal global equivalente F (Oñate, 2009). El vector U corresponde al vector de desplazamientos global de la estructura.

Para ensamblar las matrices de rigidez global, se necesita convertir las coordenadas locales en globales, para lo que cada elemento del sistema estructural debe

ser referenciado en función del sistema de coordenadas global a partir de un “origen”, al que el eje y' de cada miembro debe apuntar (Dooms et al., 2014) (Fig.2.21).

La *Matriz Global de Rigidez* ensambla desplazamientos y fuerzas que actúan en cada elemento. Cada uno de los nodos de los extremos del elemento son identificados y su ubicación es expresada en la matriz. Las fuerzas que actúan en los nodos se distribuyen en filas dentro de la matriz, en lo que constituye el Vector Fuerza Global F . De requerirse fuerzas externas, se adicionan a la fila correspondiente al nodo sobre el que actúa, añadiéndose de este modo al componente de la fila f (Fig.2.22).

Al tratarse de un problema dinámico, es necesario computar matrices de masa de los elementos que componen el sistema estructural junto con la matriz de rigidez (Liu & Quek, 2014). La matriz de masa, según Grauer & Hubbard Jr. (2013), es una función que “describe la generalizada masa e inercia de un sistema”.

c) Calcular modos propios de vibrar (*eigenmodes*) y frecuencias propias (*eigenfrecuencias*)

De acuerdo a Chopra (2012), el cálculo de *eigenmodes* y *eigenfrecuencias* forman parte del análisis modal de respuesta dinámica de estructuras y constituyen conceptos que a su vez juegan un papel importante también en el análisis de espectro de sistemas lineales con amortiguamiento.

Agrega además que el primer modo de vibrar corresponde a la forma más simple de excitación de una estructura para deformarse, por lo que el interés se

centra en los modos y frecuencias menores, que por lo general son mucho menores en cantidad que el número de grados de libertad de la estructura (Fig.2.23).

d) Calcular desplazamientos por peso propio y espectro y esfuerzos

A partir del ensamblaje de la matriz de rigidez global y matriz de masa, es posible determinar los desplazamientos por peso propio de la estructura y producto del espectro, así como los esfuerzos.

El número de modos elegidos para el análisis espectral, surge a partir de una inspección de los modos de vibrar en el análisis modal, para posteriormente determinar los esfuerzos y desplazamientos de los nodos, a partir de un vector de acción sísmica.

2.4.3.2.3 Post-proceso

a) Para cada elemento evaluar esfuerzos y desplazamientos

A partir de los análisis presentados en forma gráfica el paso siguiente es la interpretación de los resultados y evaluación del sistema estructural.



Capítulo.3

Escola Paulista Brutalista: estudos de caso

3.1 BRUTALISMO PAULISTA

La arquitectura brutalista surge a partir del *Modernismo*, y el término se deriva de “*betón brut*” (hormigón crudo) ligado a la expresión del hormigón armado visto en detrimento de las superficies bien acabadas (Fig.3.1). Otras características particulares de este estilo son: la exposición de los materiales ocupados y la técnica que permitió su ejecución—aquí la verdad constructiva y estructural son asociados al ideal de belleza—, la distinción entre estructura y cerramiento y la conjugación del proyecto arquitectónico y estructural. Se considera al *Brutalismo* como una reflexión crítica de la arquitectura de vidrio y acero del *Modernismo* y podría ser considerado como pionero de la prefabricación en la arquitectura en las décadas de 1960 y 1970 (Sanvitto, 2013).

El *Brutalismo* inicia en la década de 1950, tiene su apogeo en los 60's y decadencia en la década de 1970 y 1980. En Brasil se destaca en el estado de São Paulo, donde un grupo de arquitectos fundó la *Escuela Paulista Brutalista*. No fue una manifestación aislada vinculada únicamente al contexto local, sino se había nutrido del discurso y resultados de foros internacionales entre los años 50 y 70 del siglo pasado. En los proyectos arquitectónicos desarrollados por la *Escuela Paulista*, se desarrollaron soluciones estructurales que se integraban al conjunto arquitectónico, en las que se observa la importancia del trabajo conjunto entre ingenieros—en el desarrollo y dimensionamiento de estructuras—y arquitectos—en el desarrollo del proyecto arquitectónico y su concepción estructural (Athanasopoulos & Kenchian, 2017).

La arquitectura paulista, fue eclipsada por la escuela

carioca durante las dos décadas iniciales del *Modernismo* en Brasil. A mitad del siglo XX, São Paulo se beneficiaría del auge económico y se encaminaba como metrópoli industrial con el cierre de importaciones en 1947. A esto se sumó el agotamiento de la propuesta carioca al final de la década de 1950 que combinaba principios de Le Corbusier con rasgos del Movimiento Nativista (Luccas, 2010).

Al inicio de la segunda mitad del siglo algunos factores constituyeron un tejido de ideas homogéneas para la arquitectura paulista: el referencial de Mies van der Rohe, cuestionamientos políticos de Vilanova Artigas y su relación de admiración y rechazo por la arquitectura de Le Corbusier, la influencia del arte constructiva de los concretistas (Fig.3.2), la inspiración de Oswaldo Bratke en la arquitectura norteamericana (Fig.3.3) y la internacionalización dando continuidad a la arquitectura de inmigrantes como Franz Heep, Lucjan Korngold y Giancarlo Piretti, a través de nombres como David Libeskind, Plínio Croce y Roberto Aflalo (Fig.3.4)

(Luccas, 2010: 37).

En 1959, en el artículo “*Arquitetura Paulista*” publicado en el *Diário de São Paulo*, el ingeniero-arquitecto Luis Saia denunciaba la formación de un campo profesional local, organizado en torno a los movimientos de renovación arquitectónica, a partir de las nuevas instituciones de enseñanza formadas a lo largo de los años 1940. Los profesionales de la ciudad se caracterizaron por: alejarse de las grandes firmas constructoras, su aproximamiento a movimientos artísticos locales, una matriz de arquitectura carioca, la

distinción entre la actividad politécnica y la disciplina de bellas artes y el alejamiento de las iniciativas estatales (Dedecca, 2012).

Hacia 1960, Flávio L. Motta—filósofo y pintor brasileño—define a la arquitectura paulista como una “producción local, colectiva y alternativa de la arquitectura carioca”, de la que Vilanova Artigas se convertiría en el principal protagonista de una “intensa actividad doctrinaria” (Motta, 1960). Flávio Motta agrega que, debido a la inestabilidad de la industria de la construcción de la época, la arquitectura de Vilanova Artigas se caracterizó por la “economía de recursos” y por ser “humanista y socialmente comprometida”, además comienza a ser vinculado al *Movimiento Brutalista Internacional* por figuras como él y el crítico italiano Bruno Alfieri.

Como ocurrió en cualquier lugar del mundo donde surgió el *Brutalismo*, éste era sinónimo de un lenguaje arquitectónico alternativo, que en su discurso ético—base del correcto ejercicio de la arquitectura—remarcaba la necesidad de “mantener auténticos ideales modernos” (Zein, 2012). Para el arquitecto brasileño Danilo Hideki Abe (2009), el aspecto social de la profesión, se remonta a su formación como arquitectos, caracterizada por la “confianza en el hormigón como elemento industrializado y la solución del espacio a partir de la eficiencia de las formas”.

A mediados de 1960 el “tema paulista” se instala por primera vez en la discusión de la arquitectura moderna de aquel país.

A raíz de la emergencia de un lenguaje moderno, la valorización de su originalidad, la articulación entre modernidad y tradición colonial y la nece-



Figura 3.1. Pilar de hormigón en bruto de la Unité d'Habitation de Marsella de Le Corbusier

Fuente: Plataforma Arquitectura (2015). Recuperado de: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/771341/clasicos-de-arquitectura-unite-dhabitation-le-corbusier?ad_medium=gallery

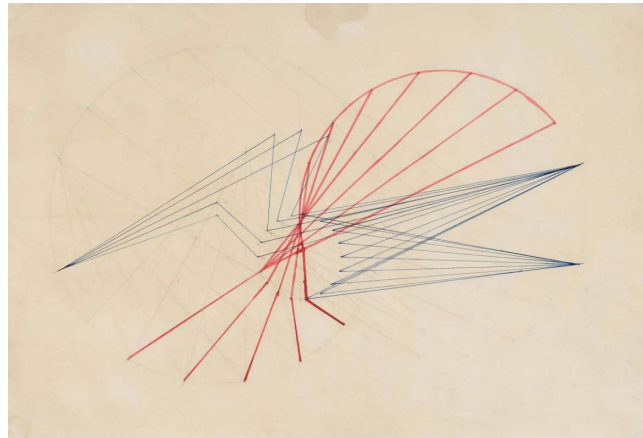


Figura 3.2. Arte constructivo de Waldemar Cordeiro

Fuente: Tumblr (s.f.). Recuperado de: <https://www.tumblr.com/tagged/waldemar+cordeiro>



Figura 3.3. Residencia Oscar Americano de Oswaldo Bratke

Fuente: Plataforma Arquitectura (2012). Recuperado de: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-198373/residencia-oscar-americano-oswaldo-bratke?ad_medium=gallery



- a) Edifício Arará de Franz Heep (1953)
- b) Edifício CBI Esplanada de Lucjan Korngold (1946)
- c) Edifício Chipre y Gibraltar de Giancarlo Piretti (1952)
- d) Edifício João Ramalho Plínio Croce y Roberto Aflalo (1958)
- e) Residência Antônio Maurício da Rocha de David Libeskind (1958)

Figura 3.4. Arquitectura de inmigrantes

Fuente: Arquivo Arq (s.f.). Recuperado de: <https://www.arquivo.arq.br/>



sidad de construcción simbólica de una nueva nación se desarrollaron lecturas que delegaron a un grupo de profesionales de Rio de Janeiro, un papel central en el proceso de renovación arquitectónica (Dedecca, 2012, p.94).

De esta manera para la arquitecta brasileña Paula Gorenstein Dedecca (2012) tres puntos podrían considerarse como los que orientan la opinión sobre lo que se conoce como identidad paulista: su relación a partir de la arquitectura moderna brasileña (escuela carioca), su conexión con la tendencia brutalista internacional y Vilanova Artigas como figura central.

Varios arquitectos paulistas liderados por Vilanova Artigas, junto con otras personalidades como Rino Levi, Affonso Eduardo Reidy, Lina Bo Bardi y Paulo Mendes da Rocha, estructuraron un pensamiento que delineaba las principales estrategias de la Arquitectura Paulista (Ferrando Bramona, 2014), y que según la arquitecta brasileña Ruth Verde Zein, en su tesis doctoral *A Arquitetura da Escola Paulista Brutalista 1953-1973* (2005), las obras que materializaron el pensamiento de este movimiento, pueden ser identificadas según los siguientes criterios establecidos en su *Abecedário das características da arquitetura da Escola Paulista Brutalista*:

En relación al partido arquitectónico:

- preferencia por la solución en un único bloque que contenga todas las actividades y funciones del programa requerido;
- de existir más de un volumen, o cuerpo, hay una jerarquía evidente entre el principal y los demás anexados al primero;

- la relación con el entorno existe por contraste visual, integrándose al sitio básicamente a través de los accesos;
- búsqueda de horizontalidad en la solución volumétrica del edificio.

En relación a la composición:

- preferencia por la solución en “caja portante” (Citrohan, Le Corbusier);
- preferencia por la solución en “planta genérica” (espacios completamente libres, Mies);
- preferencia por la solución del techo mediante una cuadrícula uni o bi-direccional (de manera miesiana) frecuentemente superpuesta independiente sobre las estructuras inferiores;
- habitual empleo de vacíos verticales interiores que responden a juegos de niveles, que permitiesen valorar visuales y recorridos que apuntaban hacia espacios interiores comunes sin un programa definido;
- frecuente organización de los espacios internos de manera flexible, no fragmentada e interconectada;
- los elementos de circulación internos definen zonas y usos, mientras los externos se caracterizan por una fuerte plasticidad;
- recurrencia del uso de núcleos compactos—que concentran las funciones de servicio horizontal y verticalmente las funciones de servicio—que definen la distribución y zonificación funcional de los demás ambientes.

En relación a las elevaciones:

- predominancia de llenos sobre vacíos, con po-

cas aberturas, o con aberturas protegidas por extensiones de las losas que sirven de equilibrio, incluso de cobertura, con o sin el auxilio de paños verticales colgados (a manera de lambrequín o platabanda);

- decantación por iluminación cenital complementaria o exclusiva, llegando a ser considerada la cubierta como quinta fachada;
- inserción o colocación de elementos complementarios de carácter funcional-decorativo, como tinglados, gárgolas, vigas-canal, entre otros, casi siempre realizados en hormigón crudo.

En relación al sistema constructivo:

- empleo de estructuras de hormigón armado en su gran mayoría, y en ocasiones hormigón pretensado, utilizando losas nervadas uni o bi-direccionales, pórticos rígidos o articulados, pilares con diseño trabajado análogamente a las fuerzas estáticas soportadas, decantación por espacios libres, entre otros;
- empleo de cierres en hormigón armado fundido en sitio que se aprovecha también en paredes divisorias internas;
- las estructuras se realizan en hormigón armado, aunque el proyecto prevé el uso de hormigón pretensado;
- empleo habitual, aunque menos frecuente, de cierres en albañilería de ladrillos y/o bloques de concreto visto;
- la estructura de los volúmenes anexos es independiente, aun cuando están bajo el cuerpo principal.

En relación a texturas e iluminación:

- las superficies de hormigón armado o albañilería de hormigón son expuestos, dando importancia a la rugosidad de la textura consecuencia de su manufactura, recibiendo algunas veces protección de pintura;
- iluminación natural lateral débil y difusa, que contrasta de la iluminación abundante y natural cenital

En relación a características simbólico-conceptuales:

- énfasis en la austeridad y homogeneidad de la solución arquitectónica, obtenida a través del uso de una paleta restringida de materiales;
- énfasis en la constructividad de la obra, didacticismo y claridad de la solución estructural;
- énfasis en la noción de cada edificio como potencial prototipo, o por lo menos en solución que busca ser completada para tornarse ejemplar, y finalmente repetible;
- énfasis en la idea de prefabricación como método ideal de construcción, a pesar de la remota posibilidad de su realización;
- énfasis en el carácter experimental de cada ejercicio arquitectónico, tanto a nivel constructivo como programático

Para Verde Zein (2005), a partir de fines del siglo XX en adelante la obra de la *Escola Paulista Brutalista*, ha sido revalorizada por su valor artístico y por el lugar que ocupa en el ámbito de la arquitectura moderna brasileña e internacional. Además, opina que muchas de sus obras pueden ser ya consideradas como

patrimoniales dignas de estudios e investigaciones, en las que los valores arquitectónicos constitutivos del brutalismo permiten entender este estilo arquitectónico de mejor manera.

3.2 JOÃO BATISTA VILANOVA ARTIGAS

3.2.1 Biografía

João Batista Vilanova Artigas, nace en la ciudad de Curitiba—capital del estado de Paraná—, el 23 de junio de 1915. Hijo de Alda Vilanova Artigas y Brasília Artigas. Vilanova Artigas llegó a la arquitectura por la vía de la ingeniería. Dada su facilidad por las matemáticas ingresa a la Escuela de Ingeniería de Paraná en 1932 antes de trasladarse a la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (POLI-USP) donde culmina sus estudios en 1937 (Ferrando Bramona, 2014). En aquel momento todavía no se había creado la Facultad de Arquitectura en esta universidad.

Vilanova Artigas describe su formación en la POLI-USP, como un curso de ingeniería que incluía un programa de *Pequeñas y Grandes composiciones*—como en

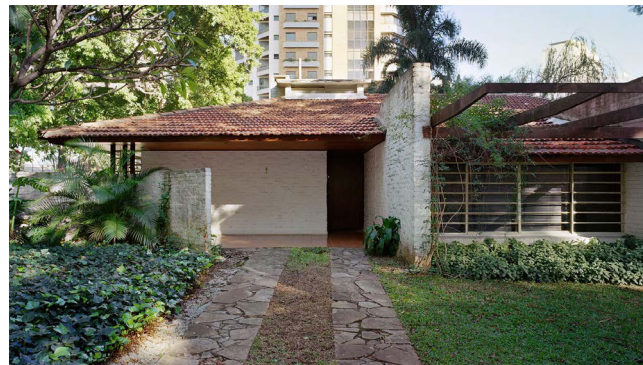


Figura 3.5. Residencia de João Batista Vilanova Artigas (Casinha)

Fuente: Kon, N. (s.f.). Recuperado de: https://artsandculture.google.com/asset/_/DwE8blvWABNB0g

Bellas Artes—, clases de historia de la Arquitectura y una cátedra de Estética y Urbanismo. En los años 1936 y 1937 en la *Escola de Belas Artes* hizo el curso de dibujo con conocidos artistas que posteriormente se los conoció como la *Familia Artística Paulista* (Ferraz, Puntoni, Pirondi, Latorraca & Artigas, 1997). Durante su estancia en la POLI-USP, se desempeñó como sustituto de la Cátedra de Historia de Arquitectura y profesor de la Cátedra de Composición de Arquitectura (Editorial Acrópole, 1970).

Fue colaborador en las oficinas de los arquitectos Osvaldo Bratke y Carlos Botti (1935/37) y Gregori Warchavchik (1937/39), y hasta 1944 fue socio de su amigo, el arquitecto-ingeniero Dúilio Marone. Éste último, expresaría en relación al dominio técnico de la construcción y gusto por los detalles de Artigas (Carrasco & Llerena, 2010):

“muchas cosas vinieron en línea directa de la oficina de Bratke y Botti, ellos diseñaban mucho el proyecto. Solo muchos años después es que tuvimos un diseñador auxiliar: desde un comienzo era Artigas quien diseñaba todo (...) Hasta



Figura 3.6. Residencia Rio Branco Paranhos

Fuente: Prata, P. N. (s.f.). Recuperado de: <https://www.pedronapolitanoprata.com/casa-rio-branco-paranhos>

aquella época, mediados de 1945 o hasta fin de 1945, buena parte de los arquitectos mantenían despachos de construcción (...) Pero luego, los arquitectos o la mayor parte de ellos pasó a solo proyectar. Esa fue la razón de la separación de nuestra sociedad”

(Marone, 1980:81).

La primera fase de la obra del arquitecto, denominada “wrightiana” (1938-1946), coincide con sus primeros años de práctica profesional con la firma Marone & Artigas, y con la posterior apertura de su propio escritorio en 1944, junto al arquitecto y calculista Carlos Cascaldi—quien había sido su alumno. Ese mismo año, forma parte del grupo que el Instituto de Arquitectos de Brasil Departamento de São Paulo (IAB-SP). Durante este período, empezaban a llegar a Brasil, revistas norteamericanas que retrataban los proyectos de Frank Lloyd Wright—a quien Artigas admiraba. Destacan de este período obras como la primera residencia de Artigas conocida como la Casinha (São Paulo-1942) y la residencia *Rio Branco Paranhos* (São Paulo-1943) (Fig.3.5 y Fig.3.6).

En 1947, recibe una beca de estudios por 13 meses de la *Fundación Guggenheim*, que le permite viajar a Estados Unidos y conocer la enseñanza de la arquitectura en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (Palma da Silva & Bedolini, 2017).

De regreso a Brasil, en 1948, junto con un grupo de profesores de la POLI-USP, participa en la creación de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo (FAU-USP). En la FAU-USP fue jefe de la Cátedra de Proyecto IV y presidente del

Departamento de Proyecto (Editorial Acrópole, 1970).

La segunda fase en la obra del arquitecto según Palma da Silva & Bedolini (2017), tuvo a Le Corbusier como principal influencia, que había sido estudiado por el racionalismo carioca. La arquitectura moderna internacional, que anteriormente había sido renegada por Artigas, fue la base para su obra entre 1946 y 1955, período denominado “fase corbusiana”. Su influencia fue clara en la casa *Czapski* (São Paulo, 1949) (Ver Fig.3.7), que posee una cubierta mariposa—ocupado por Marcel Breuer por primera vez en la *Casa en el Jardín del MoMA* (Fig.3.8)—, rampas, pilotis, además de hormigón blanco y paños de vidrio, semejante a la segunda residencia de Artigas (São Paulo, 1949) (Fig.3.9); otra obra destacada de este período es la residencia *João Luiz Bettega* (Curitiba, 1953) (Fig.3.10).

Sin embargo, a inicios de la década del 50, Vilanova Artigas expresa públicamente en dos artículos sus diferencias con Wright y Le Corbusier, de quienes toma distancia. En los artículos “*Le Corbusier e o Imperialismo*” de 1951 y “*Os Caminhos da Arquitetura Moderna*” de 1952, critica al capitalismo y la producción arquitectónica, y propone un nuevo modo de hacer arquitectura. Aquí Artigas critica la arquitectura destinada a los más privilegiados, que difiere de su aspiración de una arquitectura para todos (Palma da Silva & Bedolini, 2017).

A partir de 1956, la casa *Baeta*, (Fig.3.11) marca un punto de inflexión en la forma de proyectar de Artigas. La fachada de la casa es un muro ciego de hormigón armado, que tiene registros de la madera con la que se encofró. De esta manera, será la estructura la que daría forma a obras posteriores del arquitecto, expuestas a



Figura 3.7. Casa Czapski

Fuente: Gizmo Architectural Review (2015). Recuperado de: <http://www.gizmoweb.org/2015/08/100-anni-di-artigas/>



Figura 3.8 Casa en el jardín del MoMA

Fuente: Stoller, E. (1949). Recuperado de: <https://www.nytimes.com/2007/05/14/arts/design/14mode.html>



Figura 3.9. Segunda Residência de João Batista Vilanova Artigas
Fuente: Kon, N. (s.f.). Recuperado de: <https://www.nelsonkon.com.br/en/ca-sa-vilanova-artigas/>



Figura 3.10. Residência João Luiz Bettega
Fuente: Barbosa, L. J. (2014). Recuperado de: <https://www.flickrriver.com/photos/93256055@N00/19801758030/>



Figura 3.11. Casa Baeta
Fuente: Kon, N. (s.f.). Recuperado de: <http://www.nelsonkon.com.br/en/ca-sa-baeta/>



Figura 3.12. Club de Tennis Anhembi
Fuente: Plataforma Arquitectura (2014). Recuperado de: <https://www.archdaily.com.br/br/626874/classicos-da-arquitetura-anhembi-tenis-clube-joao-batista-vilanova-artigas-e-carlos-cascaldi>



Figura 3.13. Garaje de Barcos del Club de Yates de Santa Paula
Fuente: Plataforma Arquitectura (2013). Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-321299/classicos-de-arquitetura-club-de-yates-santa-paula-vilanova-artigas>



Figura 3.14. Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Facultad de São Paulo
Fuente: Atlas of Places (2018). Recuperado de: <https://www.atlasofplaces.com/architecture/fau-usp/>

las marcas del encofrado (Tunes, 2014).

Para inicios de la década de 1960, Vilanova Artigas, empezaría a utilizar el concreto de manera “creativa” durante su estancia en Londrina. Se trataba de una época en la que el concreto era empleado en estructuras de vigas y losas, pilotis y rampas, aunque siempre revestido (Thomaz, 2005).

En 1961, realiza una serie de proyectos en São Paulo, que definirían los lineamientos principales de lo que hoy se conoce como *Escola Paulista*, entre los que destacan el Club de Tenis Anhembi (São Paulo, 1961), Garaje de Barcos del Club de Yates de Santa Paula (São Paulo, 1961-1964) y el edificio de la FAU-USP (São Paulo, 1961-1968) en la Ciudad Universitaria (Fig.3.12, Fig.3.13 y Fig.3.14). Esta “fase brutalista”, conserva de la primera fase la “simplicidad del empleo de materiales”, y de la segunda “una estética basada en el uso de técnicas contemporáneas”. Se caracteriza también por el uso del concreto en bruto, en “nítido rechazo a la tradición brasileña de ligereza a favor de una impresión de peso” (Bruand, 1998), y “una volumetría de prismas puros” (Sanvitto, 1994).

Durante la década del 60, lideró un movimiento para reformar la enseñanza en búsqueda de una formación más completa para el arquitecto. Se incorporaron disciplinas de diseño industrial y comunicación visual para dar paso a una mayor técnica constructiva. También les imprimió importancia a materias relacionadas al arte, cultura y sociedad. Estas nuevas líneas curriculares influenciaron posteriormente a un gran número de escuelas de arquitectura del país. La participación de Vilanova Artigas en el ámbito académico, sumado a la característica producción de

arquitectura paulista que vinculaba al brutalismo con la tradición constructiva—como se lo venía haciendo desde tiempos coloniales—y el Plan de Acción del Gobierno de Carvalho Pinto que dio oportunidad a los arquitectos brasileños, serían factores decisivos en la difusión de la obra del arquitecto (Junqueira de Camargo, 2015).

Durante su estancia en la POLI-USP, se desempeñó como catedrático sustituto de la Cátedra de Historia de Arquitectura y profesor de la Cátedra de Composición de Arquitectura. Mientras que en la FAU-USP fue jefe de la Cátedra de Proyecto IV y presidente del Departamento de Proyecto (Editorial Acrópole, 1970).

En 1964, se instala el Régimen Militar en Brasil, y dada su militancia a favor del Partido Comunista Brasileño (PCB), es separado por la FAU-USP ese mismo año. Se exila en Uruguay, y regresa clandestinamente en 1965, aunque, en 1969 es nuevamente apartado como consecuencia del Acto Institucional N° 5 - AI-5—quinto de una serie de decretos emitidos por la Dictadura Militar Brasileña. Diez años después, regresa a la FAU-USP como docente, luego de someterse a un concurso para profesor titular donde permanece hasta su muerte.

João Batista Vilanova Artigas fallece el 12 de enero de 1985. Es sin dudas, uno de los más importantes arquitectos brasileños, recibiendo de la Unión Internacional de Arquitectos (UIA), el premio Jean Tschumi en 1972, por su contribución a la enseñanza de arquitectura y el premio Auguste Perret en 1985, por su obra construida.

3.2.2 Pensamiento

La práctica de Vilanova Artigas integraba el diseño arquitectónico y tecnologías avanzadas de construcción, similares a las de Walter Gropius, aunque con diferentes resultados formales (León, 2014). Vilanova Artigas en una conferencia denominada *O “Desenho”* en marzo de 1967, se muestra a favor del uso de máquinas y tecnología, de los que considera como medios para el arquitecto desarrolle su trabajo. En el pensamiento de Vilanova Artigas el hacer histórico del hombre se divide en dos: 1) dominar la naturaleza, que “fue y es una técnica capaz de obligarla y desdoblarla a nuestras necesidades y deseos”. 2) “hacer las relaciones entre los hombres, la historia como iniciativa humana”.

El arquitecto encuentra en este dualismo el origen del conflicto entre técnica y arte, que más que separar debería unir, y resalta la importancia del arte como una de las formas de acción del hombre, necesarias para la *“creación de una naturaleza propiamente humana”*. Considera, además, que este conflicto *“desaparecerá en la medida en que el arte sea reconocido como lenguaje de los diseños del hombre”* (Artigas, 1967).

En la obra de Vilanova Artigas, la estructura es arquitectura, como el propio arquitecto ha manifestado: *“la estructura, para el arquitecto, no debe desempeñar el papel humilde de esqueleto, sino exprimir la gracia con que los nuevos materiales permiten dominar las formas”* (Ferraz, Puntoni, Pirondi, Latorraca & Artigas, 1997). De esta manera, al estar asociada la estructura con la organización de espacio, resultan ambas indisolubles para un entendimiento global de su trabajo.

Según el arquitecto español José María García del Monte (2006: 80), los edificios de Vilanova Artigas se

originan de “una voluntad de jugar con el equilibrio: estructuras “tensas”, equilibradas después de haber introducido en ellas el desequilibrio”. Con respecto a la relación arquitectura-gravedad, Vilanova Artigas expresaría: *“busco el valor de la fuerza de la gravedad (...). Lo que me encanta es usar formas pesadas, llegar cerca del suelo y, dialécticamente, negarlas”* (Kamita, 2000). Obras como el Garaje de Barcos del Club de Yates de Santa Paula (Fig.3.15), materializan el aproximamiento al concepto de equilibrio de Vilanova Artigas.

Los icónicos pilares de la arquitectura brutalista en Brasil, tuvieron en Vilanova Artigas a su máximo exponente, y merecen consideración especial. La forma de estos elementos resulta de una investigación del comportamiento estructural y la “voluntad de trascender la función a través de la forma”. El hormigón utilizado en los pilares reduce al mínimo el problema del pandeo con piezas de concreto robustas. La plasticidad del material permitió una mayor libertad en el proyecto, lo que permitió que la estructura de columnas y pilares dejara de estar configurada en basa, fuste y capitel (Farinati, Bonfim, Cristóforo & Verlangeiro, 2016).

El ejemplo más representativo de Vilanova Artigas, con el que revoluciona el concepto de columna, es el pilar tipo situado en el perímetro de la FAU USP (Fig.3.16). Éste no posee fuste, y su base se encuentra directamente con el capitel (Kamita, 2000). La forma de estos pilares, se manifiesta de forma semejante a los diagramas de momento flector de un pórtico simple de articulaciones rígidas (Fig.3.17), lo que demuestra que Vilanova Artigas dominaba aspectos del comportamiento estructural. Según la arquitecta brasileña Anna Clara Giannecchini en su tesis de

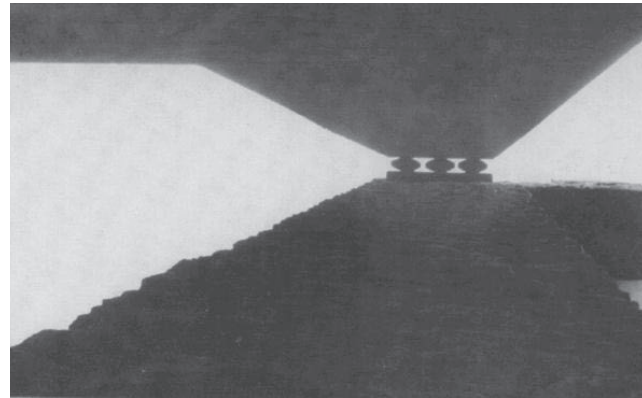


Figura 3.15. Apoyos del Club de Yates Santa Paula
Fuente: Plataforma Arquitectura (2013). Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-321299/clasicos-de-arquitectura-club-de-yates-santa-paula-vilanova-artigas>

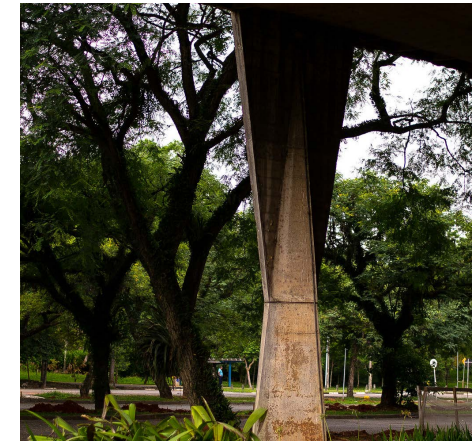


Figura 3.16 Tipología de columna sin fuste de la FAU-USP
Fuente: Miura, P. (2013). Recuperado de: https://www.flickr.com/photos/paulisson_miura/12014876606/

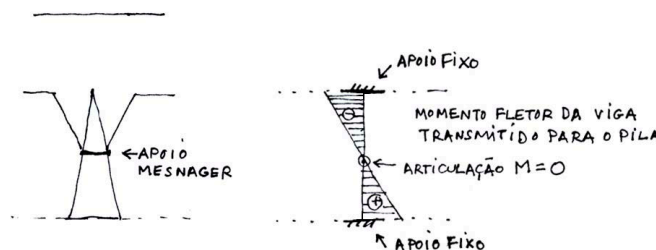


Figura 3.17. Momento flector transmitido en sentido longitudinal del pilar externo del pilar periférico de la FAU-USP
Fuente: Giannecchini, A. G. (2009). Recuperado de: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-12032010-163544/pt-br.php>

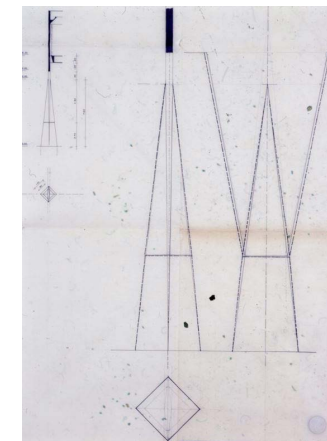


Figura 3.18. Proyecto de pilar de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo
Fuente: Archivo de la Familia Artigas (s.f.). Recuperado de: <https://www.itaucultural.org.br/ocupacao/vilanova-artigas/artetecnica/>

maestría *Técnica e estética no concreto armado. Um estudo sobre os edifícios do MASP e da FAUUSP* (2009), en una conversación sostenida con el ingeniero y profesor José Henrique C. Seraphim, éste considera que la articulación de tipo *mesnager*—articulaciones fijas que transmiten esfuerzos por adherencia—, al parecer es colocada en el lugar donde el momento tiende a cero, aunque cálculos más precisos permitirían comprobar esta hipótesis.

Para la arquitecta brasileña Borgonovi e Silva y el matemático alemán Toni Kotnik (2013), Vilanova Artigas desarrolló una “estética arquitectónica que planteaba interrogantes sobre el flujo natural de la gravedad”. Consideran que el arquitecto logró crear nuevas percepciones sobre la gravitación, a través de volúmenes grandes y suspendidos que se apoyan en elementos estructurales oblicuos y en ocasiones delgados. En su obra, la transferencia de fuerza del edificio al suelo se convierte en un aspecto importante, al considerar la manera como la edificación se “asienta”.

Es de importancia también en la obra de Vilanova Artigas el diseño de la reacción del suelo a la carga del edificio. El arquitecto diseñó zapatas que surgen del suelo hasta encontrarse con el techo sin la necesidad de columnas. De esta manera las bases pasan a ser soporte directo del techo en sus diseños (Wisnik, 2010: 21). Este tipo de “columnas sin fuste”—en el que la base está en contacto con el capitel—aparece en la FAU-USP (Fig.3.18).

Vilanova Artigas generalmente recurre a la forma trapezoidal o en “V”, cuando las fuerzas son transferidas verticalmente entre dos o más elementos de apoyo, en elementos donde reduce claramente la superficie de

esta “área de transición” (Borgonovi e Silva & Kotnik, 2013).

Los soportes también fueron motivo de estudio exhaustivo en relación a su carácter formal y estético, y con respecto a los puntos de apoyo el arquitecto declaró haberlos trabajado “*de una manera específica y original*”, mostrando “*respeto por la manera como se asientan en el suelo, cómo se equilibran, cómo se exprimen, a través de la levedad*” (Ferraz, Puntoni, Pirondi, Latorraca & Artigas, 1997). Según el arquitecto brasileño Guilherme Wisnik (2004), el diseño de los pilares forma parte de una “moralidad constructiva” que busca expresar la “mecánica de construcción, legible en cargas y empujes”.

El tratamiento especial que recibieron, se basaba en la impresión de un carácter escultórico. De acuerdo a Farinati et al. (2016), el pilar brutalista según características formales y su relación con la obra como un todo se clasifica en:

Prisma piramidal: desarrollado en los vestuarios del *São Paulo Futebol Clube* mediante dos tipologías (Fig.3.19). El pilar en “Y” escogido para esta obra se encuentra en la parte central y en las partes periféricas.

Capitel escultórico: la expresividad estructural de los pilares de la terminal terrestre de Jaú la otorgan los pilares angulares que representan las líneas de fuerza a la que se somete la estructura (Fig.3.20). Su articulación con la losa y vigas permiten cubrir espacios continuos y permiten la entrada de luz cenital.

Para Vilanova Artigas la mecánica de las estructuras está relacionada con la generación de las formas, y

señala que las tensiones involucradas en la transición de cargas entre techo y cimientos no deben ocultarse, y una vez materializadas constituyen la “parte más digna” del edificio.

3.3 PAULO ARCHÍAS MENDES DA ROCHA

3.3.1 Biografía

Paulo Archías Mendes da Rocha, nace la ciudad portuaria de Vitória—capital del estado de Espírito Santo—, el 25 de octubre de 1928. Hijo de Angelina Derenzi Mendes da Rocha y Paulo de Menezes Mendes da Rocha. Creció en una familia de ingenieros, donde su padre fue ingeniero de puertos de navegación y se desempeñó como director de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo entre 1943 y 1947 (Cisneros Ramos, 2007).

Previo a sus estudios en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Mackenzie, en São Paulo entre 1949 y 1954, Mendes da Rocha había estudiado en la Escola Naval do Rio de Janeiro por dos años. La enseñanza de arquitectura impartida en la facultad respondía a un modelo de arquitectura historicista, mientras Mendes da Rocha se une a un grupo que se interesaba por la arquitectura moderna.

Se destaca con 29 años al vencer el concurso para el Gimnasio del Club Atlético Paulistano en 1958 en colaboración con el arquitecto João E. de Gennaro (Fig.3.21). Esta obra le valió el Gran Premio Internacional “Presidência da República” en la VI Bienal de São Paulo en 1961, que destacó el “ingenio de la estructura” y la “belleza plástica del edificio”. Durante el período 1959-1961, fue miembro del Consejo Directivo



Figura 3.19. Tipologías de pilares de los Vestuarios del *São Paulo Futebol Clube*
 Fuente: Arquitetura Brutalista (s.f.). Recuperado de: <http://www.arquiteturabrutalista.com.br/fichas-tecnicas/DW%201961-55/1961-55-fichatecnica.htm>



Figura 3.21. João E. de Gennaro
 Fuente: Arcoweb (2005). Recuperado de: <https://www.arcoweb.com.br/projeto-design/entrevista/joao-eduardo-de-gennaro-01-08-2005>



Figura 3.22. Sede Social del Club de Hockey de Goiás
 Fuente: Barbosa, L. J. Recuperado de: <https://www.archdaily.com.br/br/627109/classicos-da-arquitetura-sede-social-do-joquei-club-de-goias-paulo-mendes-da-rocha-e-joao-eduardo-de-gennaro/>

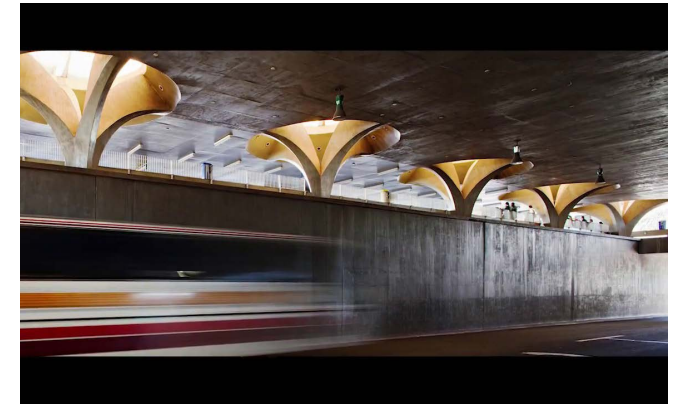


Figura 3.20. Terminal terrestre de Jaú
 Fuente: Kon, N. (s.f.). Recuperado de: <https://artsandculture.google.com/asset/the-ja%C3%BA-bus-station-jo%C3%A3o-batista-vilanova-artigas/IQGAdQFsj-FJBmg>



Figura 3.23. Edifício Guaimbê
 Fuente: Revista Acrópole (1967). Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/343>

del Instituto de Arquitectos de Brasil - IAB/SP (Editorial Acrópole, 1967).

En 1961, siendo muy joven, es invitado por João Batista Vilanova Artigas para participar como profesor en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo (FAU-USP). Mendes da Rocha reconocería la importancia de Vilanova Artigas en su formación, destacada por la visión particular que éste tenía de la arquitectura que conjugaba ingeniería y filosofía (Cisneros Ramos, 2007).

A partir de 1962 dicta la cátedra de “Proyectos IV”. De esa época destacan obras como la Sede Social del Club de Hockey de Goiás (1962) (Fig.3.22) y el Edificio Guaimbê (1962) (Fig.3.23). A raíz del Golpe de Estado en Brasil de 1964—año en el que construye su residencia personal (Casa en Butantã)—, Mendes da Rocha decide no trabajar con el gobierno al mantener diferencias con el mismo. En 1969, consecuencia del Acto Institucional Nº 5 - AI-5, le son revocados sus derechos políticos, y la Universidad de São Paulo le prohíbe enseñar (Castello, Frank & Spinelli, 2016). Ese mismo año resulta ganador del concurso para construir el Pabellón de Brasil para la Expo de Osaka en 1970 (Fig.3.24).

La década de 1970, está marcada por la construcción obras residenciales como la Casa Masetti (1969-1970) (Fig.3.25), Casa Millán (1970-1974) (Fig.3.26), Casa King (1973) (Fig.3.27) y Casa Junqueira (1976-1980) (Fig.3.28), todas ubicadas en la ciudad de São Paulo. En 1972 ocupa por primera vez el cargo de presidente del IAB/SP, al que regresaría para el período 1986-1987.

Retorna a la Universidad de São Paulo después de la amnistía en 1980 en condición de auxiliar de enseñanza hasta convertirse en profesor titular en 1988—donde se jubila, al haber cumplido 70 años de edad. Sus últimos años de docencia, marcan el inicio de la construcción de algunas de sus obras emblemáticas: el Museo Brasileño de Escultura (1986-1995) (Fig.3.29) y la Tienda Forma (1987-1994) (Fig.3.30), donde continuaría con su enfoque urbanístico del proyecto (Sá, Wisnik & Simões, 2018).

Paulo Mendes da Rocha, adquiere notorio reconocimiento internacional a inicios del siglo XX, al ser galardonado con el Premio Mies van der Rohe latinoamericano (2000). En 2006 se le distingue con el Premio Pritzker y con el León de Oro a la trayectoria en el marco de la Bienal de Arquitectura de Venecia, y en el año 2017 con la Medalla de Oro del RIBA.

3.3.2 Pensamiento

Mendes da Rocha pertenecía a una generación identificada con el Movimiento Moderno, dentro de la enseñanza en las facultades, caracterizadas por preferencia hacia ciertos artistas como Le Corbusier (Motta, 1967). La aproximación de Mendes da Rocha hacia Le Corbusier sería a partir de la “visión amplia de la arquitectura como forma de conocimiento” que sostenía el arquitecto francosuizo (Mendes da Rocha, 2018). Flávio Motta (1967), manejó la hipótesis que Mendes da Rocha adoptó ciertas características inherentes a los arquitectos que él considera lo influenciaron en mayor medida:

En el caso de Niemeyer: el confrontamiento “Arquitectura-Naturaleza”, donde la acción del hombre



Figura 3.24. Pabellón de Brasil para la Expo 70 en Osaka

Fuente: Archdaily (2014). Recuperado de: <https://www.archdaily.com.br/624060/classicos-da-arquitetura-pavilhao-do-brasil-em-osaka-paulo-mendes-da-rocha-e-equipe/>



Figura 3.25. Casa Masetti

Fuente: Tumblr (s.f.). Recuperado de: <https://thisisjustanothervisualnotebook.tumblr.com/post/157454977651/casa-mario-masetti-1968-paulo-mendes-da-rocha>



Figura 3.26. Casa Millán

Fuente: Friedman, D. (s.f.). Recuperado de: <https://afasiaarchzine.com/2019/03/mendes-da-rocha-2/>



Figura 3.27. Casa King

Fuente: vitruvius (2007). Recuperado de: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/17.181/6379>



Figura 3.28. Casa Junqueira

Fuente: comoVER (2013). Recuperado de: <http://comover-arq.blogspot.com/2013/11/uma-breve-inquietacao-sobre-caverna-ou.html>



Figura 3.29. Museu Brasileiro de Escultura

Fuente: Archdaily (2019). Recuperado de: <https://www.archdaily.com.br/br/875606/7-conselhos-de-grandes-arquitetos-para-jovens-arquitetos>



Figura 3.30. Tienda Forma

Fuente: vitruvius (2019). Recuperado de: https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/19.222/7411/es_ES

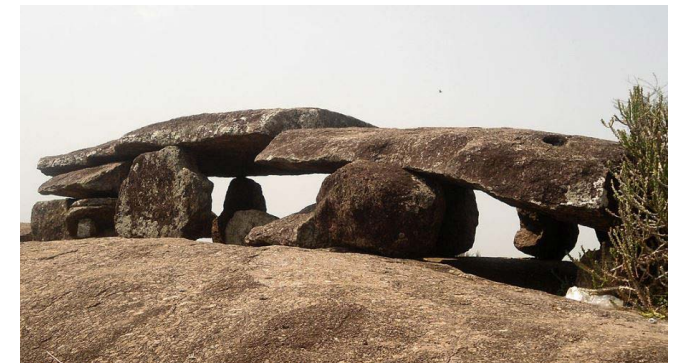


Figura 3.31. Dolmen megalítico en Dannanapeta

Fuente: Madhav, N. A. (2014). Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Dolmen>

compromete lo menos posible a la naturaleza: y en el caso de Vilanova Artigas: el confrontamiento “Arquitectura-Sociedad”, por el trato y convivencia con los conflictos del hombre en la sociedad, en busca de un vivir que garantice la presencia de ese hombre.

El arquitecto español Jaume Mayol Amengual, percibe en el dolmen (Fig.3.31) una figura referencial en la arquitectura de Mendes da Rocha. A través del dolmen, sostiene, hay un “retorno al origen”, donde un número mínimo de soportes sostiene un plano horizontal que proyecta sombra como ocurre con esta estructura primitiva.

En artículo *A la sombra del dolmen. Acerca de la arquitectura de Paulo Mendes da Rocha* (2013), Mayol Amengual propone descomponer el dolmen en tres elementos compositivos que considera esenciales en la arquitectura de Mendes da Rocha: suelo, soportes verticales y planos horizontales.

El suelo: en la obra de Mendes da Rocha, el suelo, es el punto de partida para la creación de un nuevo paisaje, donde aparecen excavaciones, taludes vegetales, plataformas de hormigón, etc. La nueva topografía que se ha configurado puede consistir en un simple movimiento de tierras como la que se observa en la Casa Gerassi (Fig.3.32), o puede ser dispuesto acorde al programa establecido como es en el caso del Museo Brasileño de Escultura (Fig.3.33).

Soportes verticales: la ubicación de estos elementos responde a su uso óptimo estructural, de manera que por lo general se encuentran regular y simétricamente distribuidos en relación al plano horizontal como es el caso del Centro de Convenciones en la Bahía de Vitória

(Fig.3.34). Los soportes verticales son independientes respecto al plano horizontal y a los demás soportes, así la autonomía de los soportes exhibe su “razón de ser estructural”.

Plano Horizontal: este elemento únicamente se asienta al pilar, de esta manera nunca se llega a empotrar. La independencia del elemento horizontal con el soporte se presenta no solo a nivel formal sino estructuralmente, como sucede en el Museo Brasileño de Escultura (Fig.3.35). Aquí, apoyos puntuales que han sido resueltos mediante cojines elastómeros, dividen, distinguen y le otorgan independencia a los soportes y al elemento horizontal.

En varios de sus proyectos, la configuración espacial se origina a través de un “juego estructural” de los elementos, según Mayol Amengual clasifica, y en relación a los mismos, Mendes da Rocha considera que la “forma-estructura-cobertura” se expresa mediante el dibujo del suelo, que muestre la transformación de la naturaleza para convertirla en habitable. Así, el arquitecto recurre al corte como herramienta que permita entender el movimiento de tierras en el proyecto, además esta operación permite situar ambientes y generar espacios para el volumen superior (Perrone, 2014), adicionalmente soluciones relativas por ejemplo a la iluminación cenital (Fig.3.36), muestran esta tendencia a “pensar en corte” (Pisani, 2013).

Para el arquitecto español Josep María Montaner, sus dibujos programáticos y maquetas de papel constituyen verdaderos diagramas. Estos diagramas los considera como “línea de fuerzas que anteceden a la definición de forma”. Montaner considera además que los diagramas

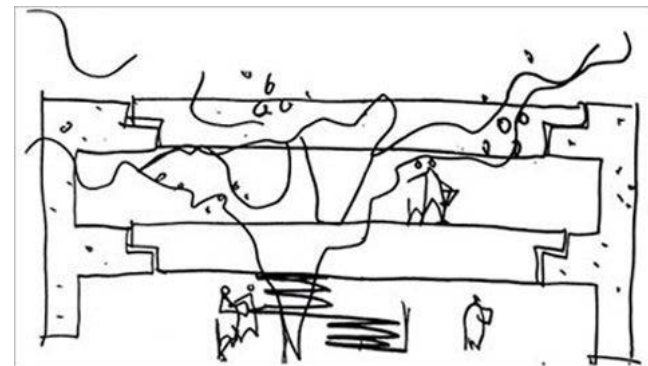


Figura 3.32. Croquis de la Casa Gerassi

Fuente: Plataforma Arquitectura (2011). Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-91181/clasicos-de-arquitectura-casa-gerassi-paulo-mendes-da-rocha/>



Figura 3.33. Vista general del Museo Brasileño de la Escultura

Fuente: Archdaily (2013). Recuperado de: <https://www.archdaily.com/444881/museu-brasileiro-de-escultura-mube-paulo-mendes-da-rocha/>

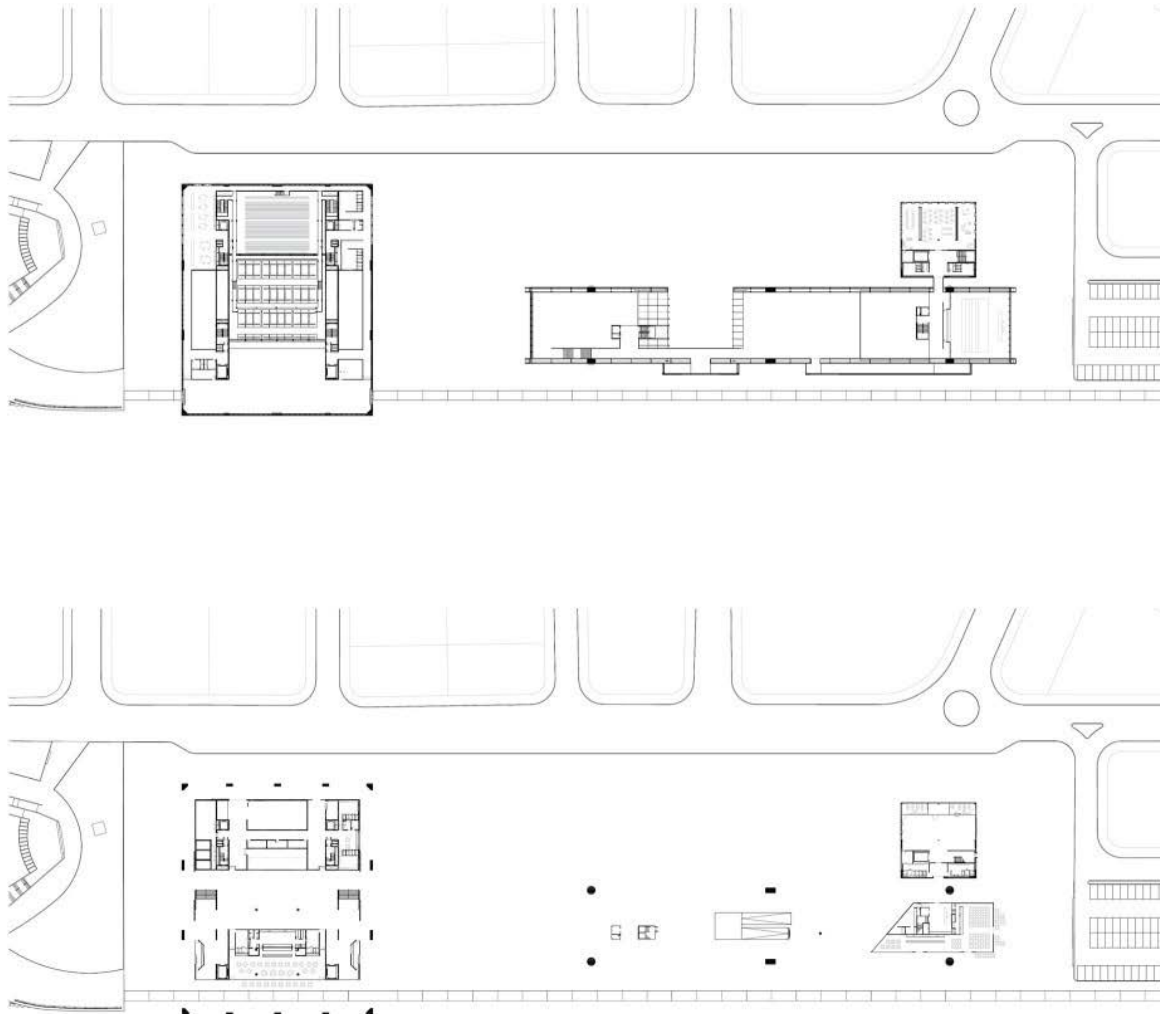


Figura 3.34. Plantas del Centro de Convenciones en la Bahía de Vitória
Fuente: Plataforma Arquitectura (2011). Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-126819/cais-das-artes-paulo-mendes-da-rocha-metro/>

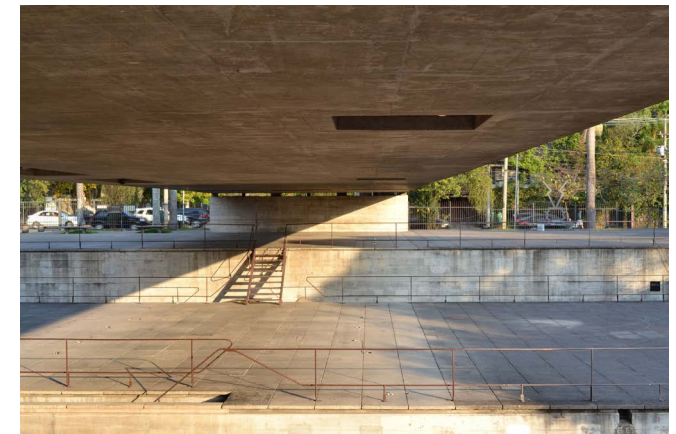


Figura 3.35. Vista de los elastómeros del Museo Brasileño de la Escultura
Fuente: Pinterest (s.f.). Recuperado de: <https://www.pinterest.es/pin/470907704766231376/?lp=true>

de Mendes da Rocha presentan una forma arquetípica (cubo, cilindro, prisma, pórtico, etc) en la que se indica la materia, fuerzas y estructuras, además de prever el programa, funcionamientos, escalas, espacios, vistas (Montaner, 2014).

El desarrollo de proyectos y concepciones estructurales en la obra de Mendes da Rocha no se fundamenta únicamente en aspectos ideológicos y teóricos. El arquitecto tiene un profundo conocimiento de las estructuras y el uso de materiales. La proximidad de Mendes da Rocha a su padre, a través de la profesión de este último, le permitió al arquitecto comprender sobre “movimientos efímeros” y “sobre escala y peso de las cosas” (Wisnik, 2018), además amplió su percepción que le permitiese adoptar concepciones estructurales que desafían a los ingenieros tanto en la fase de cálculo estructural como al momento de ejecutar la obra (Athanasopoulos & Kenchian, 2017).

Una obra ejemplar que da prueba de su conocimiento estructural, es el Gimnasio del Club Atlético Paulistano (Fig.3.37). Según Athanasopoulos & Kenchian (2017), la concepción estructural parte del razonamiento con respecto al círculo, sabiendo que el mismo es una estructura que se dilata en todos los lados de manera equivalente, cuando es sometido a diferentes temperaturas o esfuerzos de varias magnitudes. Mendes da Rocha consideró que el diseño fue fruto de un “diseño intuitivo”, en el que recibió asesoramiento del ingeniero Tulio Stucchi (compañero de clase de Vilanova Artigas) quien posteriormente “llevaría a cabo el proyecto de esa hermosa estructura, exactamente desde los esquemas más básicos” propuestos en la fase de competencia (Mendes da Rocha, 2011).

Según el arquitecto brasileño Danilo Hideki Abe (2009), el punto de partida de la arquitectura de Mendes da Rocha es el desarrollo de una “idea universal de la técnica y de un conocimiento subjetivo”. Al adquirir la arquitectura formas de la ingeniería—en la búsqueda de racionalizar la producción—, las soluciones constructivas resultan fundamentales en la investigación arquitectónica.

Para Mendes da Rocha (1999), la palabra técnica no es ajena a la dimensión humana. Considera a la imaginación como un “aspecto humano altamente técnico”, de modo que cuando algo es imaginado, se debe saber cómo hacerlo. Para la arquitecta María Isabel Villac (2016), la perfección técnica en la obra de Mendes da Rocha, “seduce como medio para alcanzar el propósito inventivo del trabajo”, disolviéndose de esta manera la dicotomía entre arte y técnica.

En una entrevista brindada a Thiago Rosenberg como parte de la exposición *Ocupação Paulo Mendes da Rocha*, el arquitecto manifiesta su visión sobre la arquitectura de la siguiente manera:

“Técnica y poesía no tienen nada de antagónico, al contrario, sin técnica no hay poesía. No hay conflicto entre arte, ciencia y técnica. Tenemos que convocar al universo de conocimiento contenido en esos horizontes, en larga escala llamados artísticos, científicos o técnicos, de una sola vez, en un razonamiento que contenga arte, ciencia y técnica: esa es arquitectura. Cualquiera de los proyectos que haya hecho en mi vida contiene todo eso, en la justa medida evidentemente” (Mendes da Rocha, 2018).

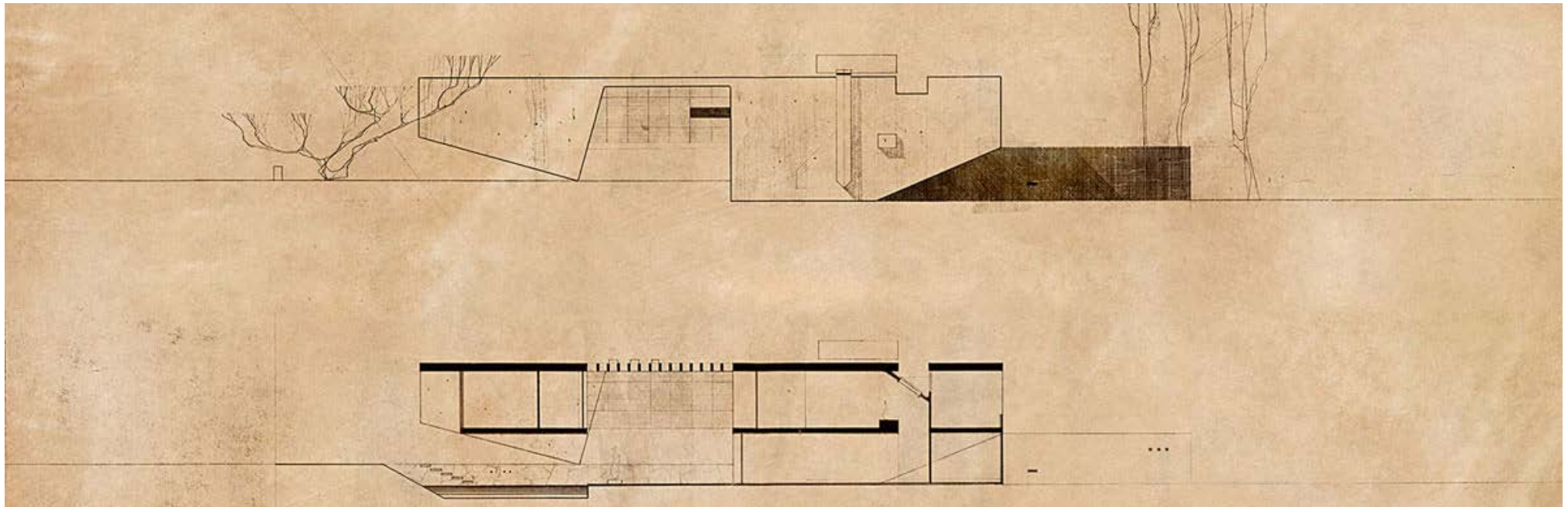


Figura 3.36. Casa Miani

Fuente: Pisani, D. (2013). Recuperado de: https://www.academia.edu/5143385/Paulo_Mendes_da_Rocha._A_constru%C3%A7%C3%A3o_de_um_horizonte_discursivo_no_in%C3%ADcio_da_carreira_do_arquiteto

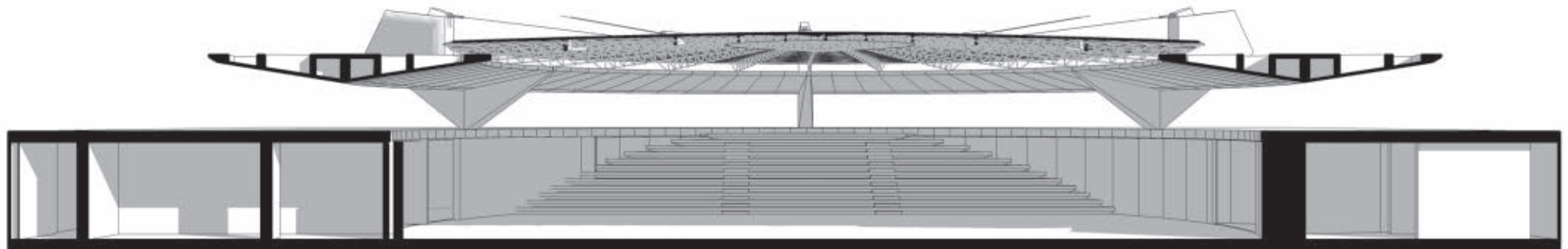


Figura 3.37. Gimnasio del Club Atlético Paulistano

Fuente: Fadiño, H., Fermin, R., & Rubertone, F. (s.f.). Recuperado de: <https://catalogosdearquitectura.wordpress.com/2018/05/21/mendes-da-rocha-paolo-1961-gimnasio-del-club-atletico-paulistano/>

3.4 ESTUDIOS DE CASO

Las obras arquitectónicas elegidas para ser analizadas son: el Gimnasio Estatal de Itanhaém, proyectado por el Arq. João Batista Vilanova Artigas; y la Casa en Butantã y el Pabellón de Brasil en Osaka, proyectados por el Arq. Paulo Archías Mendes da Rocha.

En estos tres casos, se recopiló información de las edificaciones que permita contrastar distintas fuentes, para así exponer las principales características del proyecto. Han sido seleccionadas estas obras al haber sido proyectadas y construidas dentro del período inicial y de mayor producción de la denominada *Escuela Paulista Brutalista*, de manera que comparten rasgos estructurales, funcionales y arquitectónicos marcados por una fuerte influencia de ideales sociales propios de este movimiento, que se manifiestan en los usos propios de cada programa (educativo, residencial y cultural).

En los estudios de caso se aborda la estructura desde cuatro diferentes perspectivas.

En la primera parte—Análisis Histórico—, se expone la obra situándola en un momento histórico, a través del cual es posible en el siguiente análisis, entender el contexto en el que se la concibió e interpretar las decisiones de su proyección.

En la segunda parte—Análisis Arquitectónico—, se analiza la obra desde la perspectiva del arquitecto, basado en archivos y colecciones históricas, que permitan una clara lectura de las soluciones adoptadas para organizar el espacio en función de la estructura.

En la tercera parte—Análisis Sistema Estructural—, se determinan las soluciones técnicas del sistema estructural y se indican los aspectos constructivos propios de cada obra arquitectónica.

En la cuarta y última parte—Análisis Estructural—, se describen los sistemas estructurales a través de un dimensionamiento de los elementos estructurales-arquitectónicos a partir de información de los proyectos originales, necesaria para solucionar el problema de elementos finitos.

En primera instancia, se realiza un modelo tridimensional simplificado de los elementos de la estructura en el programa *AutoCAD*. Para la representación de los elementos unidimensionales se utiliza el comando *line* y para los elementos bidimensionales el comando *3dface*, que se articulan por sus nodos.

La exportación de este modelo a *SAP2000* permite en este programa generar tablas en *Excel* que proporcionan información correspondiente a nodos, elementos unidimensionales y bidimensionales—a partir de los cuales se desarrolla el análisis en el programa de ordenador *MATLAB*.

Una vez que se ha obtenido la información relativa a nodos y elementos, en *MATLAB*, se ingresan los espesores de los elementos bidimensionales de acuerdo a los módulos estructurales expuestos en el análisis del sistema estructural. Los elementos lineales por su parte requirieron el ingreso de su área y el momento de inercia respecto a su centroide.

Mediante *StaBIL 3.0*, se ensambla la matriz de rigidez en función de parámetros relativos a las propiedades

mecánicas como el coeficiente de Poisson (ν), densidad (ρ) y el módulo de elasticidad (E). Este último obtenido a partir de la resistencia a compresión del hormigón. También se requiere el espectro de la región o país donde se encuentran las obras, para poder a partir de las cargas sísmicas, obtener los valores de esfuerzos y deformaciones que permiten entender el método proyectual y la racionalidad estructural a partir del comportamiento del sistema estructural.

Para el cálculo de esfuerzos normales y desplazamientos (deriva), al peso propio de la estructura le ha sido sumada la carga muerta y carga viva, esta última de acuerdo al uso de la edificación en función de la norma *NEC-SE-DS Cargas sísmicas diseño sismorresistente* que se fundamenta en la norma americana *ACI*.

Los modos de vibrar empleados para estos cálculos son seleccionados a partir del análisis modal considerando aquellos que presenten desplazamientos laterales y cuyo periodo no sea menor a 0.1 s, según fue indicado por el director de tesis.

De esta manera será posible determinar la eficiencia de las formas y así comprobar si la estructura cumple los requisitos de resistencia y rigidez.

3.4.1 Gimnasio Estatal de Itanhaém

3.4.1.1 Análisis histórico

Arquitectura Escolar Paulista

El desarrollo de la arquitectura escolar paulista según Vilanova Artigas (1970), inicia con la Primera República en 1889, en donde se destaca São Paulo por ser uno de los principales defensores de la autonomía de los estados. Constituye un período que se caracteriza por los primeros intentos de construir edificios escolares a través del Departamento de Obras Públicas. (Fig. 3.38).

En 1894, el arquitecto brasileño Francisco de Paula Ramos de Azevedo proyecta la *Escola Normal de São Paulo* (Fig.3.39)—primera escuela normal y actual *Instituto de Educación Caetano de Campos*. Para la arquitecta brasileña Silvia Ferreira Santos Wolff (1993) se trata de una “composición monumental caracterizada por la armonía, simetría y la superposición de órdenes”, esto último es el tratamiento de las columnas como

elemento decorativo.

Hasta 1911 las escuelas públicas republicanas se caracterizaron por soluciones espaciales de gran simplicidad, marcadas por la simetría (Fig.3.40) y de técnica constructiva arcaica.

En el texto *Sobre Escolas* publicado en la revista *Acrópole* en 1970, Vilanova Artigas señala la importancia a partir de 1922 de una serie de propuestas modernizadoras—que buscaban modernizar la enseñanza escolar—amplió la dimensión social de la edificación que se plasmó en las edificaciones. Además, los avances tecnológicos permitieron materializar soluciones técnicas que habían sido influenciadas por Le Corbusier.

En 1936/1937 empieza la construcción de escuelas en la ciudad de São Paulo a partir de la modernización de los métodos de enseñanza, sin embargo, las mismas no reflejaban la arquitectura del *Ministerio de Educación y Salud* (Fig.3.41), obra del arquitecto y urbanista franco-

brasileño Lúcio Costa. Esta arquitectura se mostraba a favor de las formas geométricas simples, uso racional de materiales y métodos económicos de construcción.

Las escuelas de esta época ofrecieron solución a la creciente demanda de estudiantes, y en torno a esta “arquitectura de masas” surgen innovaciones a partir de la creación de nuevos materiales y la evolución de las técnicas constructivas que permitieron soluciones en gran escala. Estas nuevas construcciones marcaron la introducción del hormigón armado—sistema constructivo que aún requería de mano de obra especializada—en elementos estructurales como vigas, pilares y losas de piso y pilares. Estos últimos permitieron liberar la planta, dando lugar a las escuelas tipo “galpón”—que hasta ese momento había sido considerado un volumen aparte del edificio escolar (Wolff, 1993).

Para el período comprendido entre los años 1949 y 1954 se procura un aproximamiento formal hacia la arquitectura que venía desarrollándose principalmente



Figura 3.38. Cronología de la Construcción Escolar Paulista

Fuente: FDE: Fundação para o Desenvolvimento da Educação (s.f.). Recuperado de: <https://www.fde.sp.gov.br/PagePublic/Interna.aspx?codigoMenu=261&AspxAutoDetectCookieSupport=1>



Figura 3.39. Escola Normal de São Paulo

Fuente: Caetano de Campos: A escola que mudou o Brasil (2011). Recuperado de: <http://www.caetanodecampos.com.br/documentarios-e-entrevistas-gravadas/224/escola-normal-de-1846-a-decada-de-1980>

Plantas de escolas paulistas

13

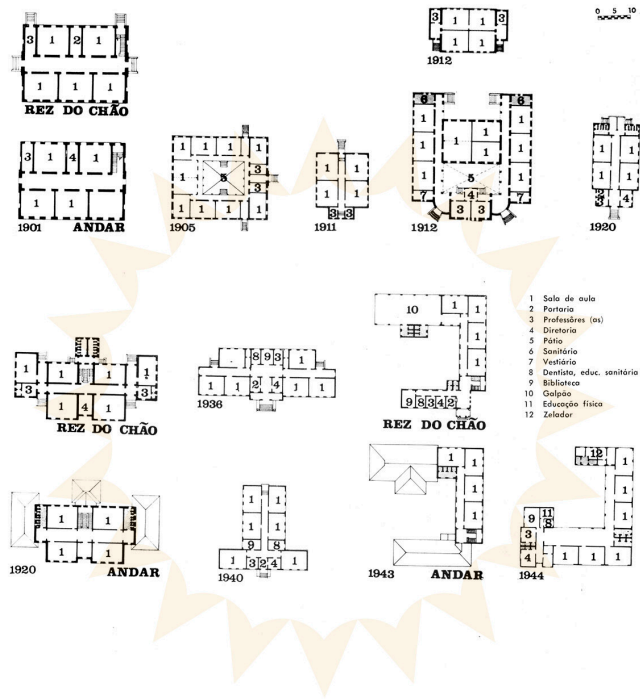


Figura 3.41. Edifício Sede del Ministerio de Educación y Salud en São Paulo
Fuente: Postales Inventadas/ Making up Postcards (2011). Recuperado de: <http://www.postalesinventadas.com/2011/01/edificio-sede-do-ministerio-da-educacao.html>

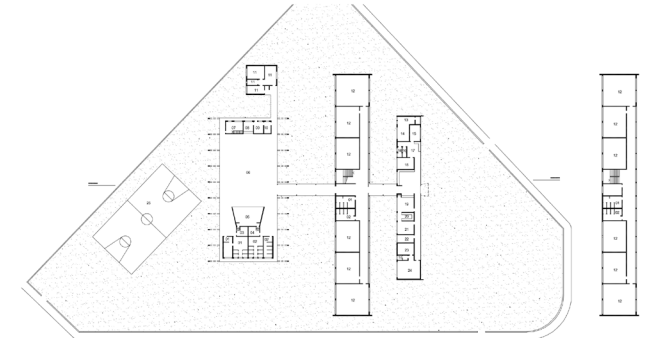


Figura 3.42. Implantación de la Escola Canuto do Vall, Bairro Água Branca, São Paulo
Fuente: Abreu, I. R. N. (2007). Recuperado de: <https://docplayer.com.br/45801917-Convenio-escolar-utopia-construida.html>

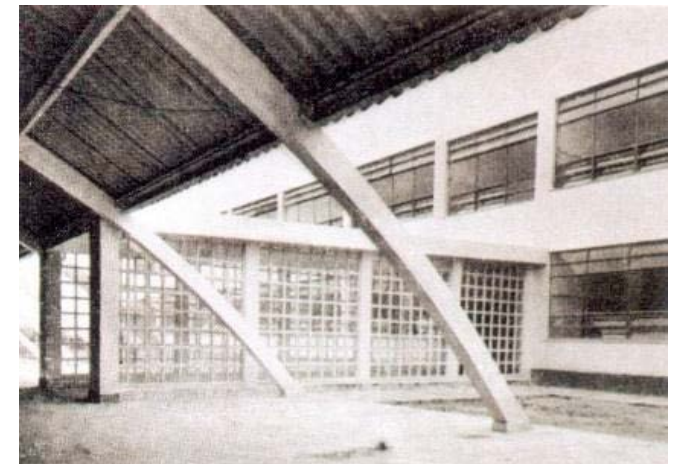


Figura 3.43. Escuela Estatal Visconde de Taunay, Bairro do Limão, São Paulo
Fuente: Abreu, I. R. N. (2007). Recuperado de: <https://docplayer.com.br/45801917-Convenio-escolar-utopia-construida.html>

Figura 3.40. Planta de escuelas paulistas
Fuente: Artigas, J. B. V. (1970). Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/educacao/377>

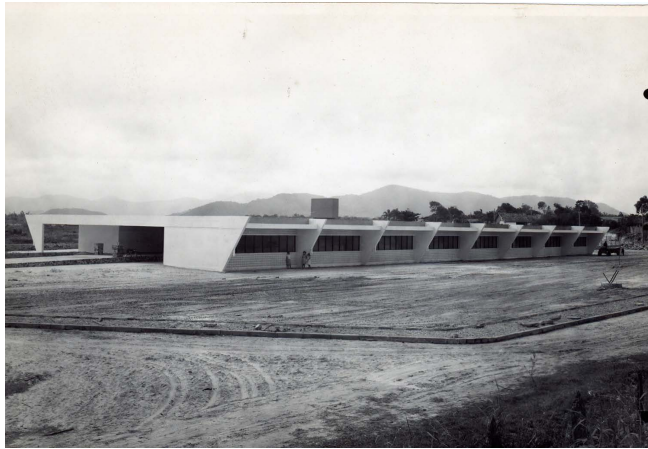


Figura 3.44. Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: Gizmoweb (2015). Recuperado de: <http://www.gizmoweb.org/2015/08/100-anni-di-artigas/3/>



Figura 3.45. Gimnasio de Guarulhos

Fuente: Archdaily (2015). Recuperado de: https://www.archdaily.com.br/769052/classicos-da-arquitetura-ginasio-de-guarulhos-vilanova-artigas-e-carlos-cascaldi?ad_medium=gallery



Figura 3.46. Gimnasio de Utinga

Fuente: Acrópole (1971). Recuperado de: <http://tede.mackenzie.br/jspui/bitstream/tede/2638/4/Denivaldo%20Pereira%20Leite4.pdf>



Figura 3.47. Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo

Fuente: Moscardi, J. (1961). Recuperado de: <https://www.facebook.com/742811282459054/photos/a.961870573886456/961870760553104/?type=1&theater>

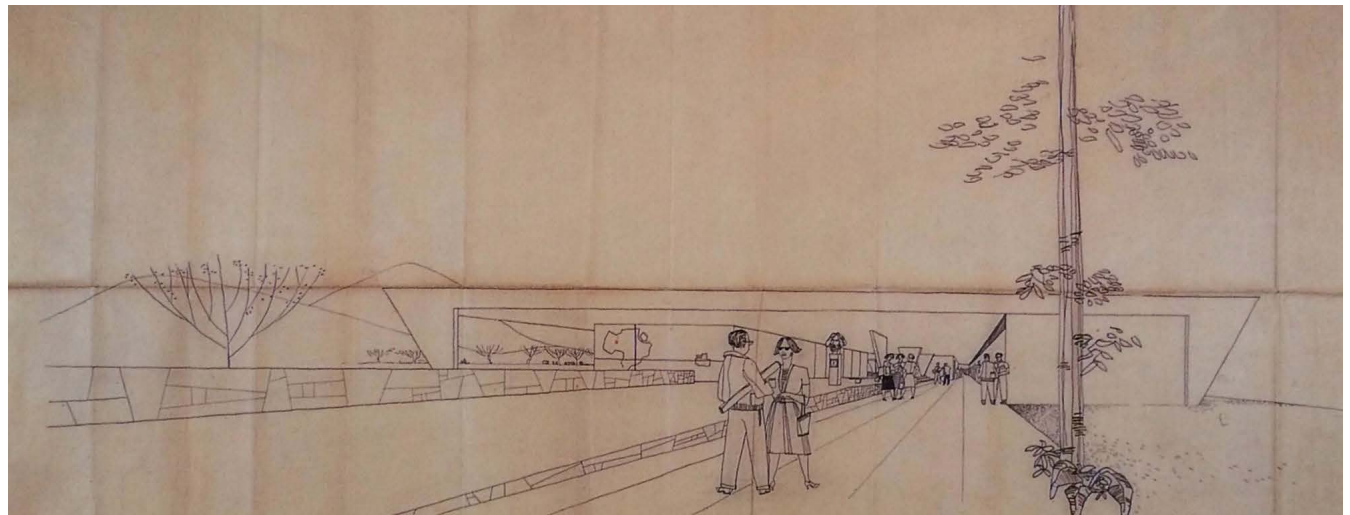


Figura 3.48. Perspectiva del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: Archdaily (2014). Recuperado de: https://www.archdaily.com.br/627614/classicos-da-arquitetura-ginasio-estadual-de-itanhaem-joao-batista-vilanova-artigas-e-carlos-cascaldi?ad_medium=gallery

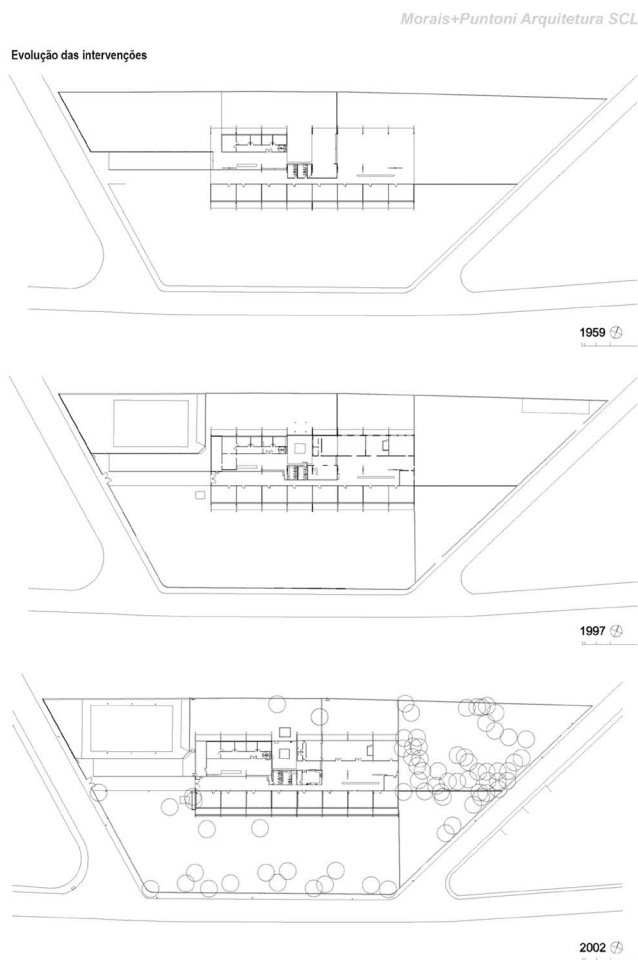


Figura 3.49. Evolución de las intervenciones en el Gimnasio Estatal de Itan-haém

Fuente: Morais+Puntoni Arquitetura SCL (2002). Diretrizes de Projetos, pp. 8. Recuperado de: Cortesía Arq. Apoena Amaral

en Rio de Janeiro mediante obras del *Convênio do Estado*—acuerdo firmado para la inversión de estados y municipios—con el Ayuntamiento de la Capital, que tenía como principales exponentes a los arquitectos Hélio Duarte y Eduardo Corona. Los cambios en relación al equipamiento escolar liderados por Hélio Duarte comprendían la adopción de la arquitectura moderna y formaron parte de una “red de propuestas de equipamientos orientados a la educación, el ocio, la cultura y la salud para niños entre 5 y 17 años”. Para Duarte las funciones del programa deberían estar claramente definidas en: zona de administración y servicio médico, zona de enseñanza y zona de recreación (Baffi, 2015).

La arquitectura escolar de este período se caracterizó por una disminución del área del programa destinado a la prestación de servicios sociales. La implantación de estas edificaciones era en terrenos muy pequeños, que no contaban con el espacio adecuado para educación física, y su relación con la ciudad era nula desde el punto de vista urbano (Artigas, 1970).

Así, siguiendo la propuesta de Duarte, estas edificaciones para cumplir con la demanda de cupos, fueron construidas de manera económica y con tecnología simple de la época. Los materiales utilizados fueron mampostería de ladrillos huecos y estructura en hormigón armado (Ferrata, 2008).

Los bloques de enseñanza, administración y recreación se conectaban mediante circulación externa. Según el arquitecto brasileño Carlos Augusto Ferrata (2008), constructivamente los volúmenes se concibieron de manera independiente y después articulados con elementos de circulación (Fig.3.42). En el caso de

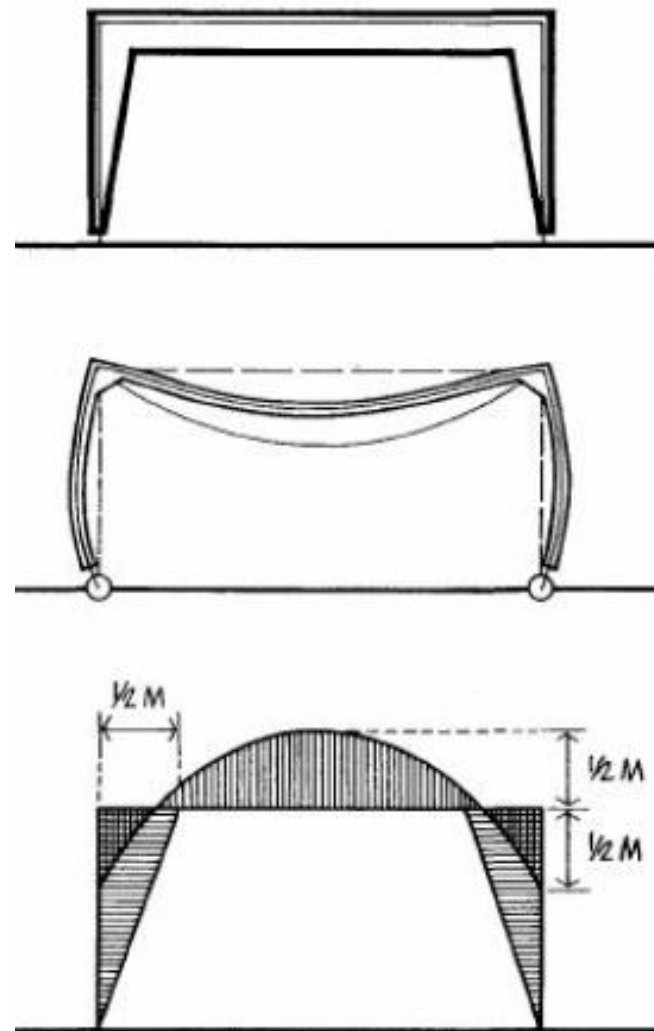


Figura 3.50. Mecanismo de un pórtico

Fuente: Heino, E. (2001). Sistemas de estruturas/Sistemas Estruturais, pp.186. Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/1208725/d44aef>

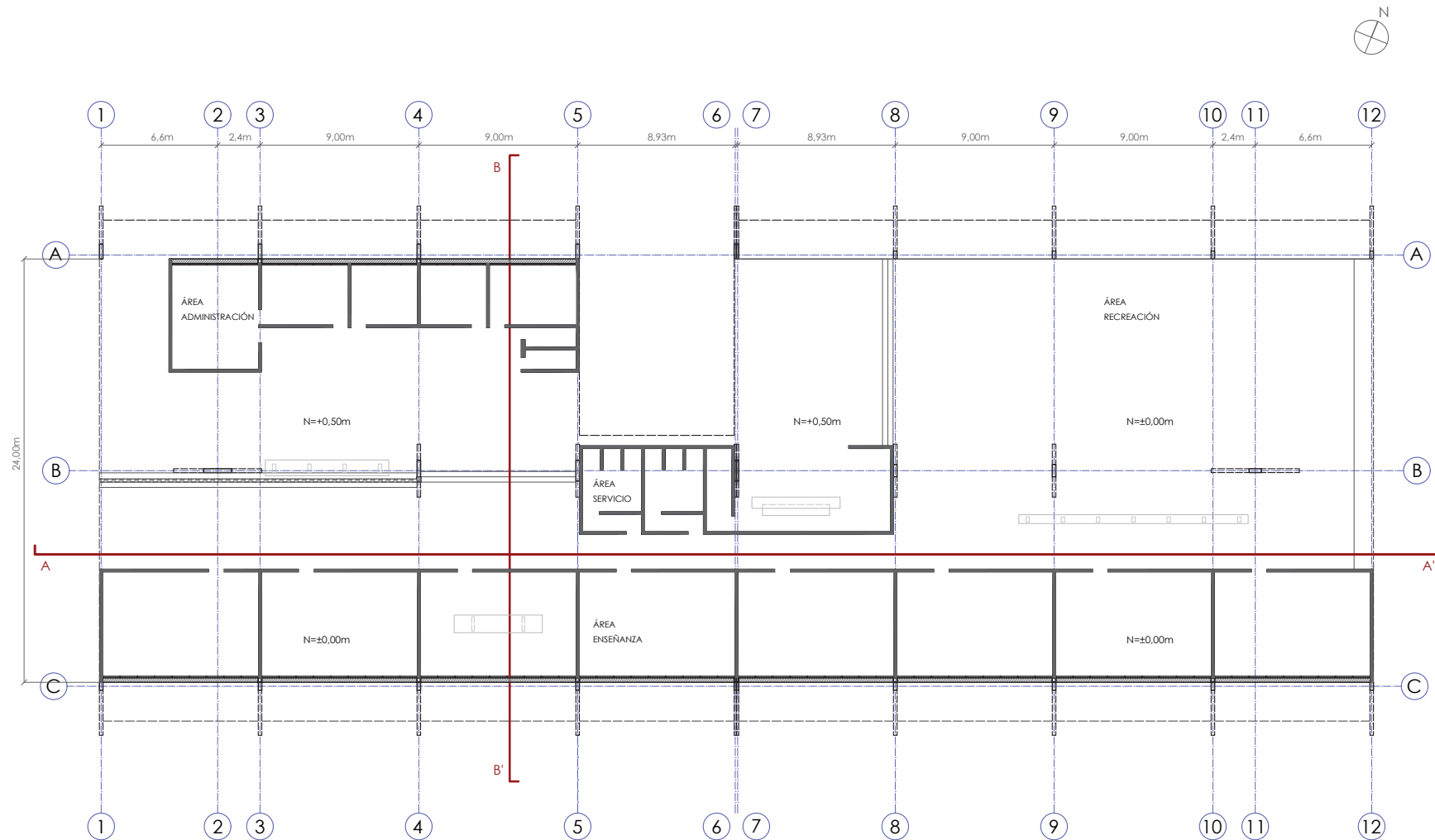


Figura 3.51 Planta arquitectónica del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Fuente: Dibujo autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia



los galpones de recreación (Fig.3.43), su estructura era de arcos prefabricados de madera u hormigón armado, destinado para presentaciones teatrales y cine educativo.

Gimnasio Estatal de Itanhaém

En 1960 se crea un nuevo organismo central de programación, el *FECE* (Fondo Estatal de Construcciones Escolares), en reemplazo de antiguos promotores de proyectos y construcción (Fig.3.38). Con Carlos Alberto Alves de Carvalho Pinto como gobernador del estado de São Paulo (1959-1963), en su Plan de Desarrollo Integrado (PLADI) conocido como “Plan de Acción” se establece un plan de emergencia que apoya a los órganos de ejecución del estado atribuyéndoles proyectos a arquitectos fuera de la entidad pública, aprovechando así la formación académica de los primeros arquitectos de la escuela paulista.

Participa de esta producción de arquitectura escolar el Arq. João Batista Vilanova Artigas en colaboración del Arq. Carlos Cascaldi—que había sido su alumno—con obras como el Gimnasio Estatal de Itanhaém, Gimnasio de Guarulhos, Gimnasio Estatal de Utinga y la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo (Fig.3.44, Fig.3.45, Fig.3.46 y Fig.3.47), ejecutados bajo el “Plan de Acción”. Los dos primeros fueron parte de la primera serie de escuelas construidas por el *Instituto de Previdência do Estado de São Paulo* (IPESP), y que según Wisnik (2006), se convertirían en modelos de arquitectura escolar en São Paulo.

De esta manera para Vilanova Artigas (1970) la incorporación de la educación al ejercicio de la

Arquitectura Brasileña daría paso a la creación de nuevas técnicas, asimilación de nuevos programas que se traduce en “volúmenes poéticos claramente definidos”.

El volumen que expresa el gimnasio, se encuentra definido por la particular forma de los pilares. En relación a este aspecto, la arquitecta brasileña Ana Clara Giannecchini (2009) considera que el diseño de los pilares de los extremos remite al diagrama de momento flector (Fig.3.50), que se puede observar en el comportamiento estructural de un pórtico simple. La arquitecta considera que, Vilanova Artigas decide hacer explícito este funcionamiento a través de la forma. De este modo, en el punto donde el momento tiende a cero, arranca el pilar.

El Gimnasio Estatal de Itanhaém fue resultado de un proceso abierto en 1958, con un presupuesto inicial de elaborado por el Ayuntamiento de Itanhaém el



Figura 3.52. Vista norte de la zona de aulas del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Fuente: Arquivo Arq (s.f.). Recuperado de: <https://www.arquivo.arq.br/ginasio-de-itanhem>

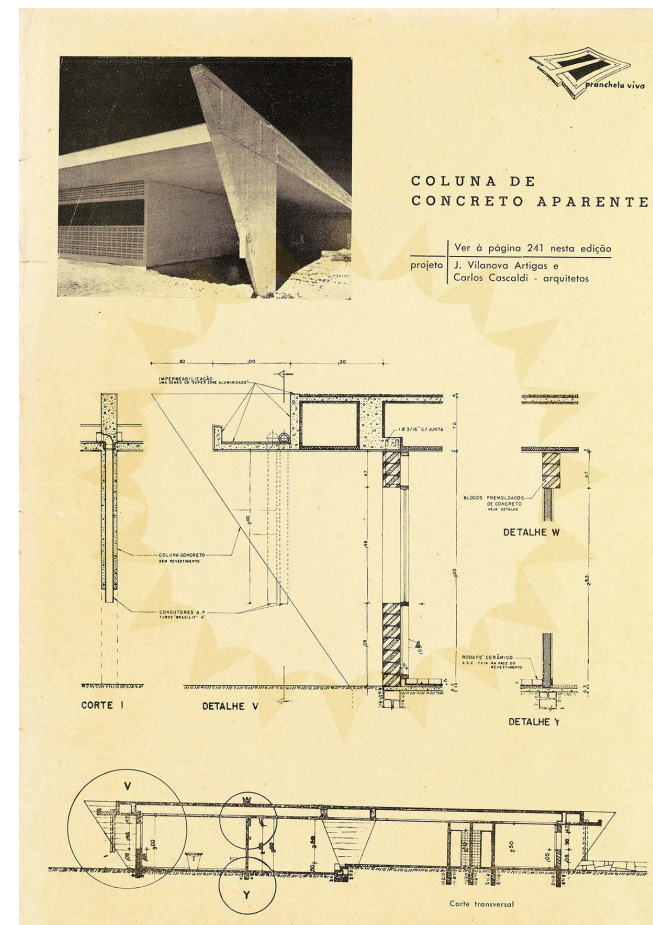


Figura 3.53. Detalle del armado mampostería con la estructura del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: Acrópole (1961), pp. 336. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/274>

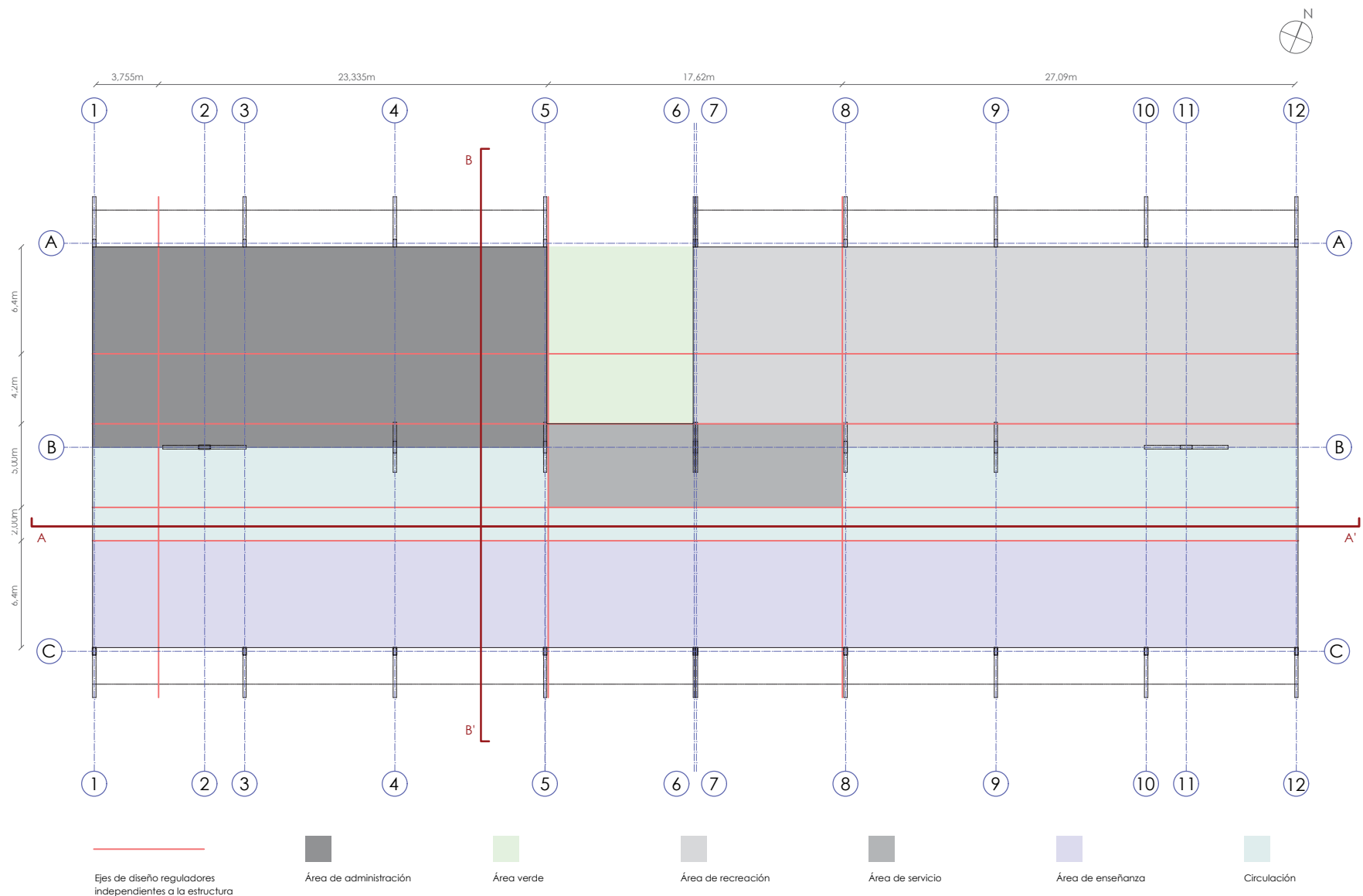


Figura 3.54. Zonificación del programa a partir de la estructura del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Fuente: Dibujo autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia



21/10/1958 por un valor de Cr\$ 9.983.133,80, y aprobado por la IPESP en un monto de Cr\$ 6.470.000,00. El 3 de agosto de 1959, se determina la participación Vilanova Artigas para proyectar el establecimiento educativo, y una semana después empezaría la construcción de la obra que se extendería entre 1960 y 1961 (Alves, 2008).

El proyecto de Vilanova Artigas preveía el uso de 560 m³ de hormigón y 73 toneladas de acero CA-37 (varillas corrugadas) para la obra de poco más de 2.000 m², presupuestada en Cr\$ 18.425.973, 60 por la entidad ejecutora y fue aprobada y contratada por Cr\$ 14.556.450,00. Fue objeto de solicitudes de prórroga de plazo en un total de 270 días, aprobados por el IPESP—que estuvo a cargo del proyecto y ejecución—, considerando que se trataba de una obra “atípica”, concluyéndose en 13 meses (Alves, 2007).

Esta edificación está situada en un municipio interior de São Paulo llamado Itanhaém—segundo más antiguo de Brasil. Se construyó del otro lado de la línea férrea—de frente a una antigua estación—, en un lote de 8.525 m². El cálculo estructural y de cimentaciones lo realizaron los ingenieros estructurales Arthur Luiz Pitta y Lello Sisto Ranzini, y la planificación estuvo a cargo del FECE.

El Gimnasio de Itanhaém está ubicado en la Av. Tiradentes, 46 –Jd. Mosteiro, a aproximadamente 500 metros del litoral paulista, en un área que formó parte del reciente proceso de urbanización de la época. A raíz de este proceso, la condición del lote—consecuencia de la fragmentación del suelo urbano—, según el arquitecto brasileño Ângelo Bucci (1998), condiciona la relación entre espacio público y privado, en la búsqueda de

Vilanova Artigas de la “ciudad ideal”.

Este centro escolar—actualmente *Escola Estadual Prof. Jon Teodoresco*—se erigió como un bloque blanco al pie de la colina de Itaguaçu donde se ubica el *Convento Nossa Senhora da Conceição*, hacia donde está orientado el acceso principal (Fig.3.48). Este lado se encuentra ubicado en una cota 50 centímetros superior al resto del edificio, y con ello Vilanova Artigas busca dotar a la edificación de un carácter urbano, vinculándola a la ciudad mediante una rampa.

Sin embargo, con el pasar del tiempo, dadas las necesidades de expansión del establecimiento, la mampostería originalmente utilizada para delimitar ciertos espacios, ha sido usada manera desmedida alterando la obra tal y como fue concebida originalmente (Fig.3.49). Según el Arq. Apoena Amaral, quién formó parte del estudio *SOMA Arquitetos*, que en el año 2007



Figura 3.55. Vista interior de la zona de administración, pasillo de circulación y bloque de aulas del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: Archivo Vilanova Artigas (1959). Recuperado de: <https://www.facebook.com/742811282459054/photos/a.1058164867590359/1058165254256987/?type=1&theater>



Figura 3.57. Vista interior de la zona de recreación del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: Archivo Vilanova Artigas (1959). Recuperado de: <https://www.facebook.com/photo?fbid=1058165404256972&set=a.1058164867590359>



Figura 3.56. Vista exterior del recorte practicado en la cubierta del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: nareal.com.vc (1959). Recuperado de: <https://www.facebook.com/photo?fbid=1058165510923628&set=a.1058164867590359>

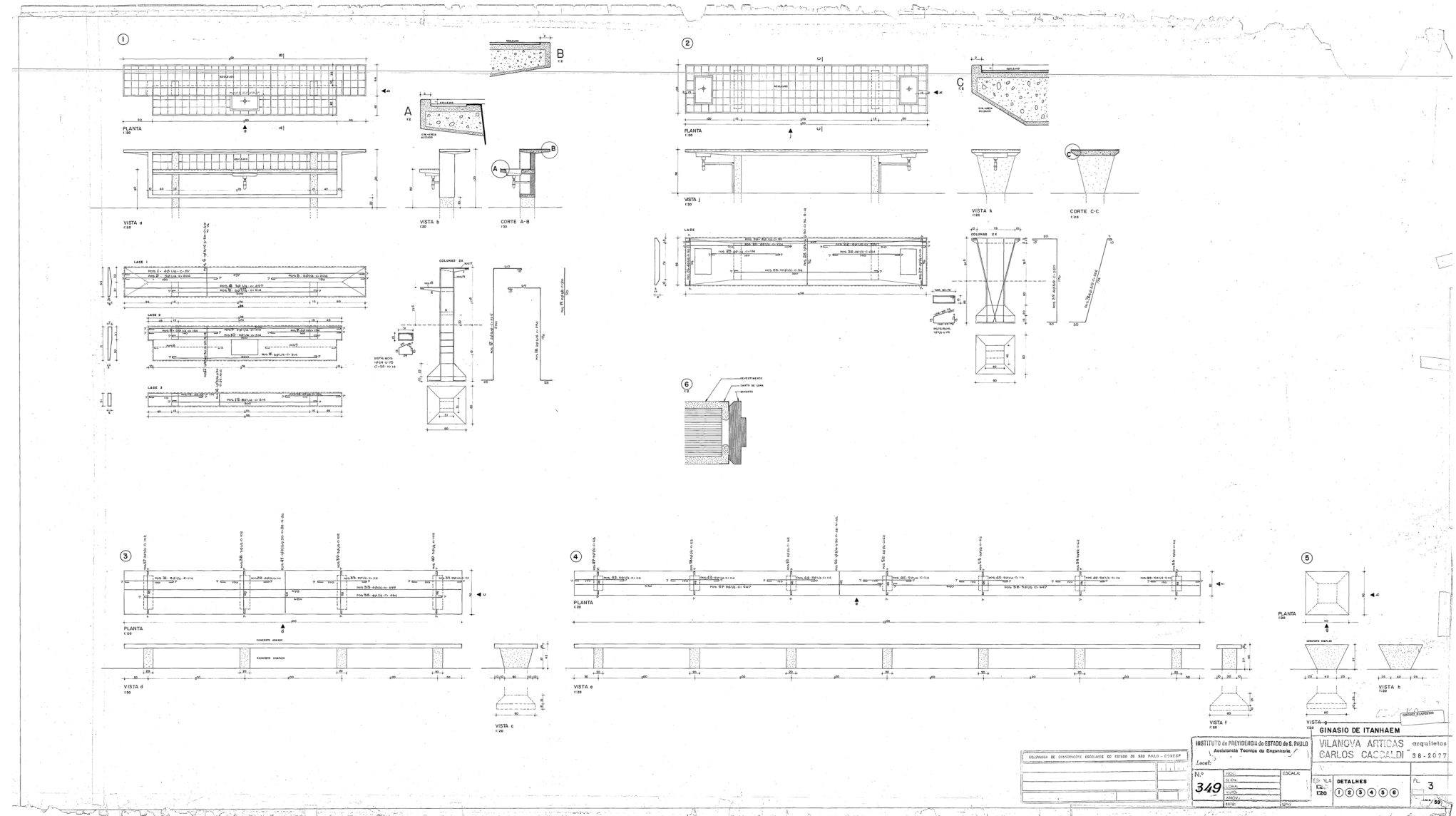


Figura 3.58. Detalles del mobiliario empleado en el Gimnasio Estatal de Itanhaém

Fuente: Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959). Cortesía de: Arq. Apoena Amaral

elaboró un proyecto de intervención y restauración, "los recursos disponibles para su ejecución fueron apenas del 25% de lo previsto, de manera que finalmente se optó por ejecutar acciones de carácter emergente" (A. Amaral, comunicación personal, 10 de marzo de 2019). En relación a la estructura se buscó protegerla de puntos de exposición de la armadura y puntos de infiltración (Morais & Puntoni, 2002).

En la sesión ordinaria del 26 de noviembre del 2012, el Consejo de Defensa de Patrimonio Histórico, Arqueológico, Turístico y Artístico del Estado de São Paulo (CONDEPHAAT) resuelve con 15 votos a favor y 4 en contra, conferirle el título de protección denominado *tombamento*—decisión relacionada con frenar los cambios morfológicos que ha presentado la obra con el transcurso de los años y que han alterado la claridad estructural con la que fue concebida (Acta n° 1689, 2012).

3.4.1.2 Análisis arquitectónico

Vilanova Artigas reconoció la particular tipología escolar que desarrolló durante de su participación en distintos proyectos dentro de la producción de arquitectura escolar paulista de la siguiente manera:

El Gimnasio Estatal de Itanhaém es el primer gimnasio que abandona el sistema de "galpón" para adoptar el patio cubierto. (...) Las escuelas que proyecté, constituirían por primera vez, y yo tengo mucho orgullo de eso, una formulación de la distribución del espacio escolar diferente de lo que la ingeniería hizo en el tiempo de la república

(Ferraz, Puntoni, Pirondi, Latorraca & Artigas, 1997, p.85 y 114).

Vilanova Artigas organiza simétricamente la estructura, al igual que la mayoría de establecimientos educativos construidos con sistemas murarios de épocas anteriores, la escala de la edificación evita además la monumentalidad propia de edificaciones escolares anteriores y también se diferencia al usar las columnas—que marcan un orden visual—por su función estructural mas no decorativa.

Utilizando hormigón armado *in situ*, Vilanova Artigas ordena el espacio a partir de pilares trapezoidales, elementos que si bien delimitan el espacio no lo clausuran. Vilanova Artigas a través de su propuesta, utiliza la cubierta como recurso que permite cobijar los espacios que anteriormente conectaban espacios dispersos, evitando así según Wisnik (2015), la "tipología fragmentada del modelo escolar" que se encontraba vigente en São Paulo.

El Gimnasio de Itanhaém es un volumen simétrico, en el que a partir de sus lados longitudinales se disponen los pilares alineados, para establecer así al pórtico como unidad estructural.

Si bien el pórtico de dos vanos es el aquel que se repite en mayor medida en la obra, el arquitecto, en los pórticos de los extremos prescinde del soporte intermedio, al haber sido éste rotado en sentido perpendicular al desarrollo de los pórticos, alcanzando de esta manera la unidad estructural una luz de 24 metros (Fig. 3.51). Así, los pórticos subsiguientes a los extremos, continúan siendo de "dos vanos", sin embargo, el soporte intermedio rota, permitiendo de

esta manera, ampliar los accesos al establecimiento (Fig.3.51), y al mismo tiempo dinamizar el espacio.

La distancia establecida entre los pilares perimetrales surge a partir del submúltiplo de tres metros—que toma como referencia el ancho de los pilares dispuestos en peristilo alrededor de un volumen rectangular, y que conforman los pórticos—liberando de este modo, el espacio necesario para desarrollar el programa previsto. Los lados perpendiculares a la dirección de los pórticos, mientras tanto, se cierran con bloques prefabricados de concreto—similares a los ladrillos huecos conocidos como *alvenaria*—utilizados para la conformación de espacios que el programa contemplaba (Fig.3.52). Esta mampostería favorece a la ventilación permanente, necesaria debido a las condiciones climáticas de la zona. Este elemento, en su parte superior pende de vigas estructurales en "L", que mediante pequeñas columnas que coinciden con los ejes de los pórticos (Fig.3.53), forman una especie de soporte para dar sustento a la mampostería.

El programa del Gimnasio de Itanhaém se distribuye en una planta única, que surge a partir de la estructura aporticada—similar al planteamiento de Mies van der Rohe en el Crown Hall—que permite cubrir amplias luces para distribuir el programa. El gimnasio se extiende 72,2 metros en sentido longitudinal y 24,45 metros transversalmente, cubriendo un área de 2.081,75 m². El proyecto se desarrolla en dos niveles, entre los cuales existe una diferencia de 50 centímetros de altura entre cada uno de los accesos (Fig.3.51).

Las necesidades propias del programa se han ubicado en torno a un "patio común de convivencia", que bien podría ser considerado como "plaza central" según

Wisnik (2015). El programa contempla actividades como: enseñanza, administración, recreación y servicio. Los espacios abiertos generados en el proyecto son resultado de las relaciones encontradas por el arquitecto entre las distintas necesidades del proyecto. (Fig.3.51). La dimensión de cada habitación varía de acuerdo a su uso específico, considerando que las paredes de cierre de ladrillo hueco son independientes del sistema estructural.

Las principales dimensiones que regulan la obra corresponden a la distancia al eje entre pilares—9 metros en sentido longitudinal y 12,225 metros (pórticos de dos vanos) en sentido transversal—en base a la cual han sido zonificados los distintos espacios que comprende el programa, y donde es manifiesto el manejo compositivo simétrico de la estructura que ordena el espacio, con respecto al eje central en dirección noroeste sudeste.

A partir del sistema estructural, es posible realizar una lectura de las distintas áreas que representan el programa establecido al momento de proyectar la edificación, así:

La primera zona—de mayor extensión—define la longitud del edificio en 72 metros. Aquí se ubican siete aulas y un laboratorio de iguales dimensiones (9,00 m ancho). El ingreso a estas aulas se realiza desde el interior a partir de un pasillo de circulación de ancho variable (5,60 y 2 metros) formado por los otros bloques identificados y limitado por los pilares del eje central longitudinal y el bloque de aulas (Fig.3.54). Se encuentra orientado en dirección sudeste y la iluminación de este bloque ocurre desde el exterior de manera que el sol no incide directamente durante la

jornada matutina (Fig.3.51). Con la puesta de sol existe ingreso de luz hacia las aulas, sin embargo, los pilares y la losa de cubierta—rematada por las vigas-canal—proyectan sombra hacia el interior. El principal elemento vertical que compone la viga de borde sobresale de la losa de cubierta, para así definir el límite para la “cama de piedras” dispuesta sobre la losa (Fig.3.53).

El segundo bloque, es decir de administración, se encuentra delimitado por de los pilares “A1”, “A5”, “B5” y “B2”. Ocupa un área de 12 x 26,9 metros y en él se ubican cinco espacios administrativos, servicios higiénicos y un área de espera. Se accede a través de un patio de acceso vestibular que se origina entre el bloque de administración y el de enseñanza (Fig.3.55). Cinco pilares definen este espacio. Aquel ubicado en sentido longitudinal (pilar “B2”) delimita el nivel superior donde se encuentra el vestíbulo, mientras los demás se desarrollan en sentido transversal (pilares “A1”, “A5”, “B4”, “B5”); estos dos últimos pilares definen las gradas a través de las cuales se accede al nivel superior (Fig.3.54). Así mismo, el acceso al bloque administrativo coincide con el ingreso al laboratorio.

El tercer bloque contiene dos espacios: el primero es un espacio cerrado con accesos a los servicios higiénicos y a una pequeña bodega, mientras el segundo es un espacio semiabierto donde se ubica el bar de frente al escenario. Las dimensiones del bloque de servicios son de 17,75 m. x 5 m. y está comprendido entre los pilares “B5” y “B8” (Fig.3.54).

Vilanova Artigas genera un recorte en la cubierta de hormigón armado, como respuesta ambiental, que permita iluminar y ventilar los servicios higiénicos de estudiantes y administrativo (Fig.3.56). Con esta

medida se genera espacialmente un jardín definido por el bloque administrativo, el escenario y los servicios higiénicos. Se trata de una solución lógica que obedece a la idea de fluidez espacial del arquitecto, siendo este jardín el nexo entre el patio de acceso vestibular y el escenario, comprendido entre los pilares “A5” y “A6” (Fig.3.54).

Finalmente, en el sector opuesto al acceso principal, el espacio comprendido entre los pilares “A7”, “A12”, “B11” y “B7” corresponde la zona de recreación. Consiste en un espacio abierto al cual se accede desde el pasillo de circulación central desde el sudeste (Fig.3.54). De esta manera, se aprovecha del sistema estructural para generar sombra a un espacio iluminado (Fig.3.57).

En esta obra, es evidente como las decisiones del arquitecto surgen a partir de la estructura. Como en el caso de las tuberías de aguas lluvias, mismas que fueron embebidas en los pilares de los extremos de los pórticos (Fig.3.53). La lógica de la estructura utilizada en pilares se refleja también en el mobiliario (Fig.3.58), cuyos apoyos han sido construidos como si se trataran de pilares trapezoidales que surgen a partir de la zapata, y que constituye un rasgo característico en varias de las obras de Vilanova Artigas.

3.4.1.3 Análisis del sistema estructural

El Gimnasio Estatal de Itanhaém fue enteramente construido en hormigón armado fundido en sitio, que dio como resultado una estructura hiperestática. El sistema estructural del gimnasio se compone de pilares, vigas y losa de cubierta, y tiene al pórtico como su unidad estructural. Aunque concebido como una serie de pórticos de aparente sencillez en la disposición de los

elementos, se trata de un proyecto que demandó cierta complejidad en el proyecto ejecutivo de la estructura.

La disposición de los pilares se ha originado a partir de una malla estructural de 24,45 x 72 metros. En sentido longitudinal se establecen tres ejes—cada 12,225 metros—y en sentido transversal 10 ejes—cada 9 metros a excepción de la distancia entre los ejes 4-5 y 6-7, igual a 8,93 metros (Fig.3.59).

En relación a estos elementos, se han identificado tres tipos de pilares trapezoidales (Fig.3.60 y Fig.3.61) y que, en función de su variación en espesor de acuerdo a su ubicación, determinan 5 módulos estructurales. Con respecto a estos elementos—que forman parte de la zapata que se encuentra anclada al suelo mediante estacas—, han sido enterrados 17 centímetros, en lo que constituiría posteriormente un sello distintivo en la obra del arquitecto. En el caso de los pilares perimetrales, éstos fueron soterrados en una cama de grava, mientras que los demás fueron enterrados en las losas de piso de los distintos niveles.

La primera tipología corresponde a los pilares perimetrales que tienen una altura de 3,96 metros, y cuyo lado más extenso alcanza los 3 metros, mismo que a medida que desciende se cierra 2,60 metros hasta el encuentro con la zapata (Fig.3.60).

La segunda tipología la integran los pilares orientados en sentido longitudinal, y son aquellos de mayor dimensión del sistema estructural, alcanzando una altura de 3,92 metros. La parte superior de este pilar corresponde a los 70 centímetros de la cubierta—losa de cubierta más vigas. A partir de esta cota, el ancho del pilar correspondiente a 5 metros disminuye hasta

los 70 centímetros (Fig.3.61).

La última tipología de pilares es ocupada en los restantes pilares centrales de 3,92 metros de altura. Al igual que los pilares perpendiculares a la estructura, parte de los mismos corresponde al espesor de la losa, a partir de la cual su ancho de 3 metros disminuye hasta los 70 centímetros (Fig.3.60).

El módulo estructural mayormente empleado corresponde a los pilares perimetrales ($e=20\text{cm}$), a excepción de los pilares centrales ($e=12\text{cm}$) utilizados para dividir a la obra en la mitad, y que pertenecen otro módulo estructural. En el eje central longitudinal, los únicos pilares orientados en esta dirección constituyen otro módulo ($e=22\text{cm}$), mientras que las dos subsiguientes ($e=20\text{cm}$) otro y las centrales ($e=12\text{cm}$).

El hecho de que la mayoría de los pilares sean perpendiculares al sentido de la estructura (Fig.3.62), facilita su sujeción (Valentim, 2003). Los dos niveles en los que se desarrolla el proyecto tienen incidencia a nivel estructural en los apoyos, de manera que, varían las secciones efectivas que trabajan en cada pilar conforme a la cota en la que se empostra.

La unidad estructural de la obra se configura a través de pilares que conforman pórticos de dos puntos de apoyo (extremos) y tres puntos de apoyo (extremos e intermedio).

A partir de los pilares se organiza la estructura de cubierta—losa nervada de 5 centímetros de espesor—con un recorte rectangular comprendido entre los ejes 4 y 5. Los ingenieros encargados del proyecto estructural, debido a la magnitud que hubiese

significado una cubierta que se extiende 72 metros, de acuerdo a la Norma Brasileña (ABNT NB-1, 1960)—que considera una junta de dilatación en edificios que en planta superen los 30 metros—previeron una junta de dilatación de 2 centímetros (Fig.3.63). Estructuralmente la cubierta se encuentra sostenida por una sucesión de cinco pórticos que transmiten la carga de la losa. Las vigas empleadas, que varían en espesor y altura, determinan los 8 módulos estructurales que componen la cubierta (Fig.3.64).

El módulo estructural más utilizado en la losa de cubierta corresponde al de la nervadura de la losa y a las vigas que se amarran los pilares centrales rotados con los pórticos de los extremos. Justamente estas vigas que conforman los pórticos de los extremos, junto con dos de las tres vigas que conforman el recorte rectangular son un nuevo módulo, mientras el restante es otro módulo utilizado. Destaca también el módulo ocupado para amarrar los pilares centrales con los pilares rotados y que llega hasta los pórticos de los extremos. En cada porción de la cubierta, este módulo fue ocupado también en sentido transversal, así como uno de 37 centímetros de espesor. En los extremos de los lados longitudinales en los que se han previsto paredes el módulo utilizado corresponde a la viga en “L”. Completan la configuración de la losa bidireccional, nervios de 7 x 70 centímetros. En sentido longitudinal han sido colocados a una distancia de 75 centímetros al eje, mientras que en el sentido opuesto la distancia entre sus ejes es de 3,50 metros y se extienden hasta las vigas que amarran los pilares intermedios (Fig.3.64).

Si bien la disposición de los soportes está más bien asociada a la idea simple del arquitecto de emplear el pórtico como unidad estructural vinculado al partido

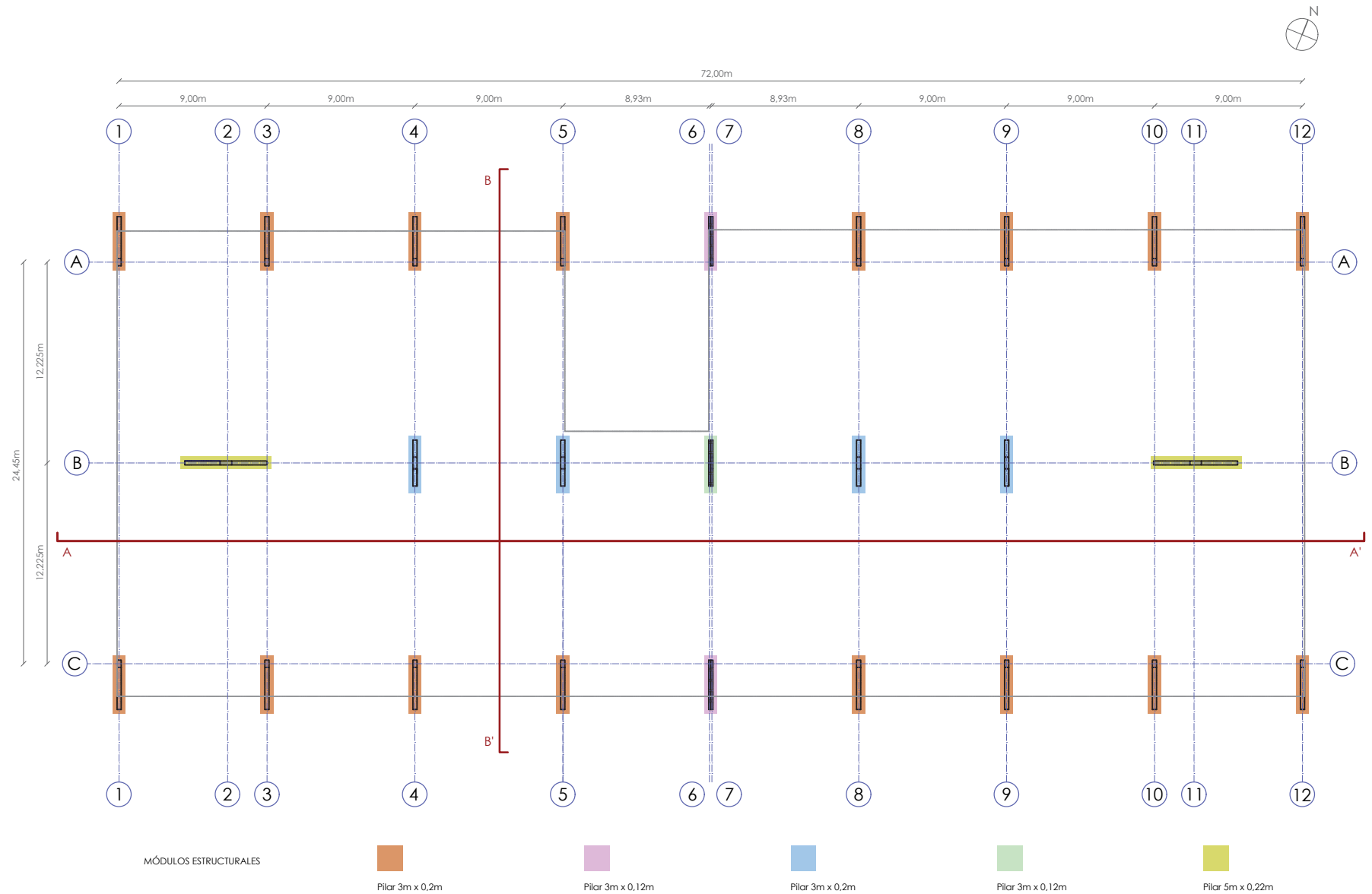


Figura 3.59. Planta estructural del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Elaboración: Dibujo del autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959)



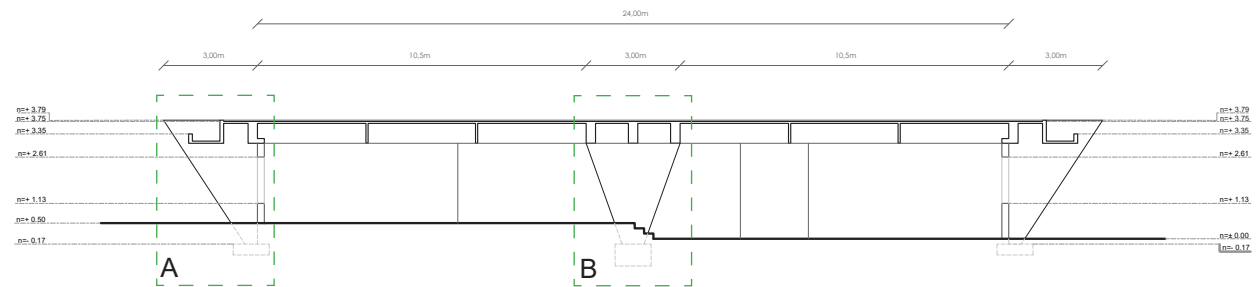
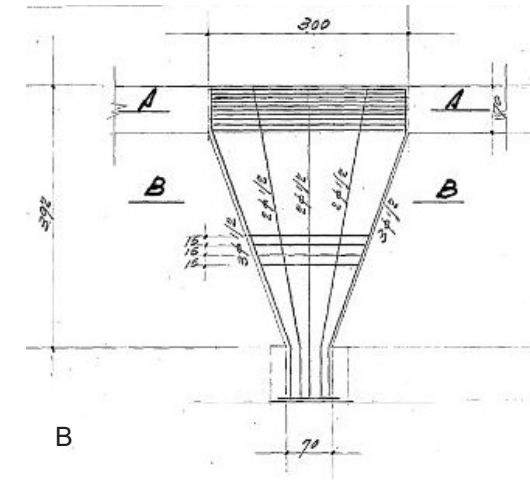
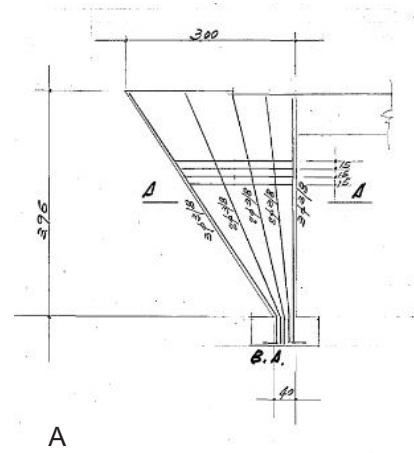


Figura 3.60. Sección transversal B-B' del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc. 1:250

Elaboración: Dibujo del autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959)

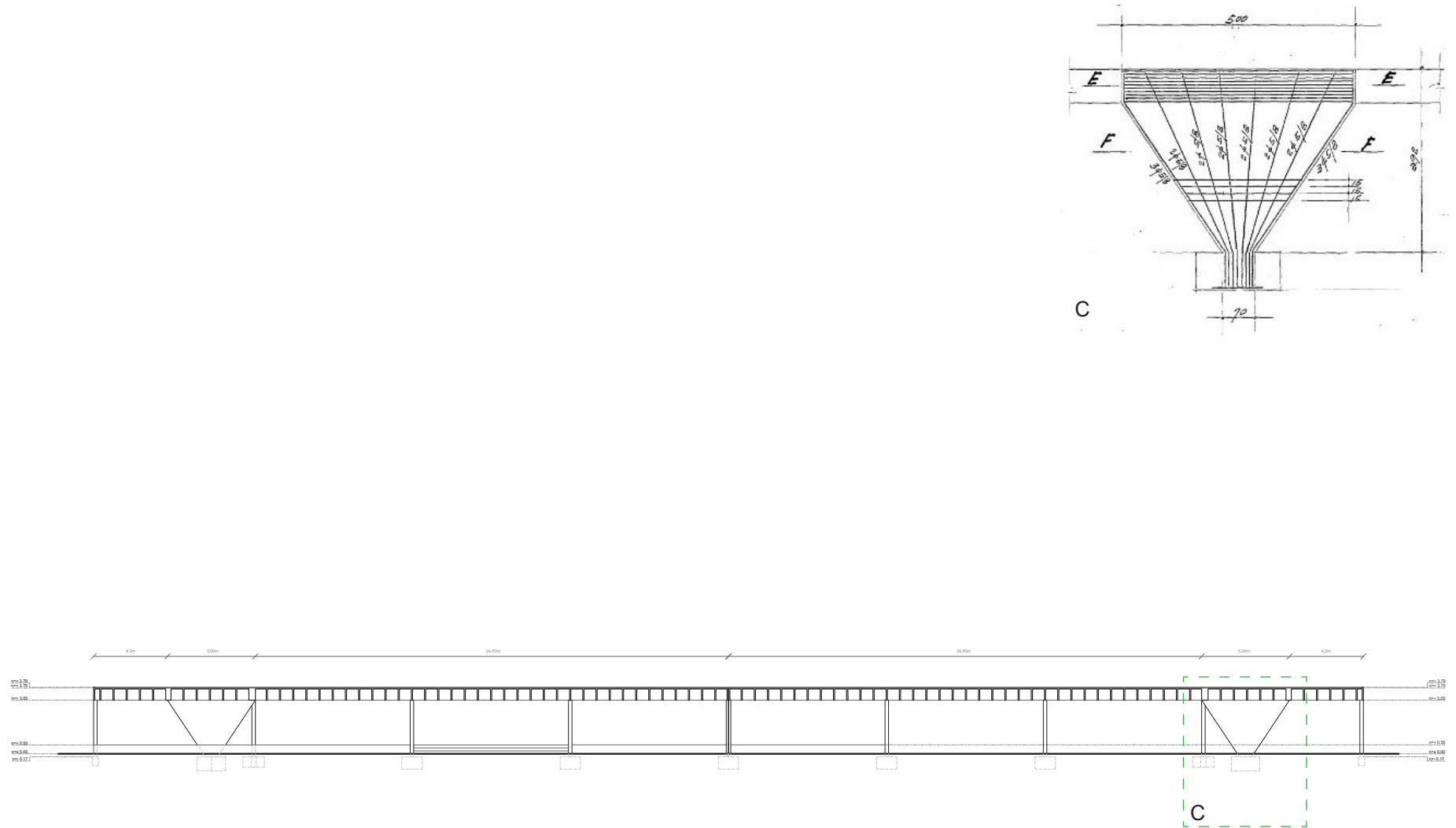


Figura 3.61. Sección longitudinal A-A' del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Elaboración: Dibujo del autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959)



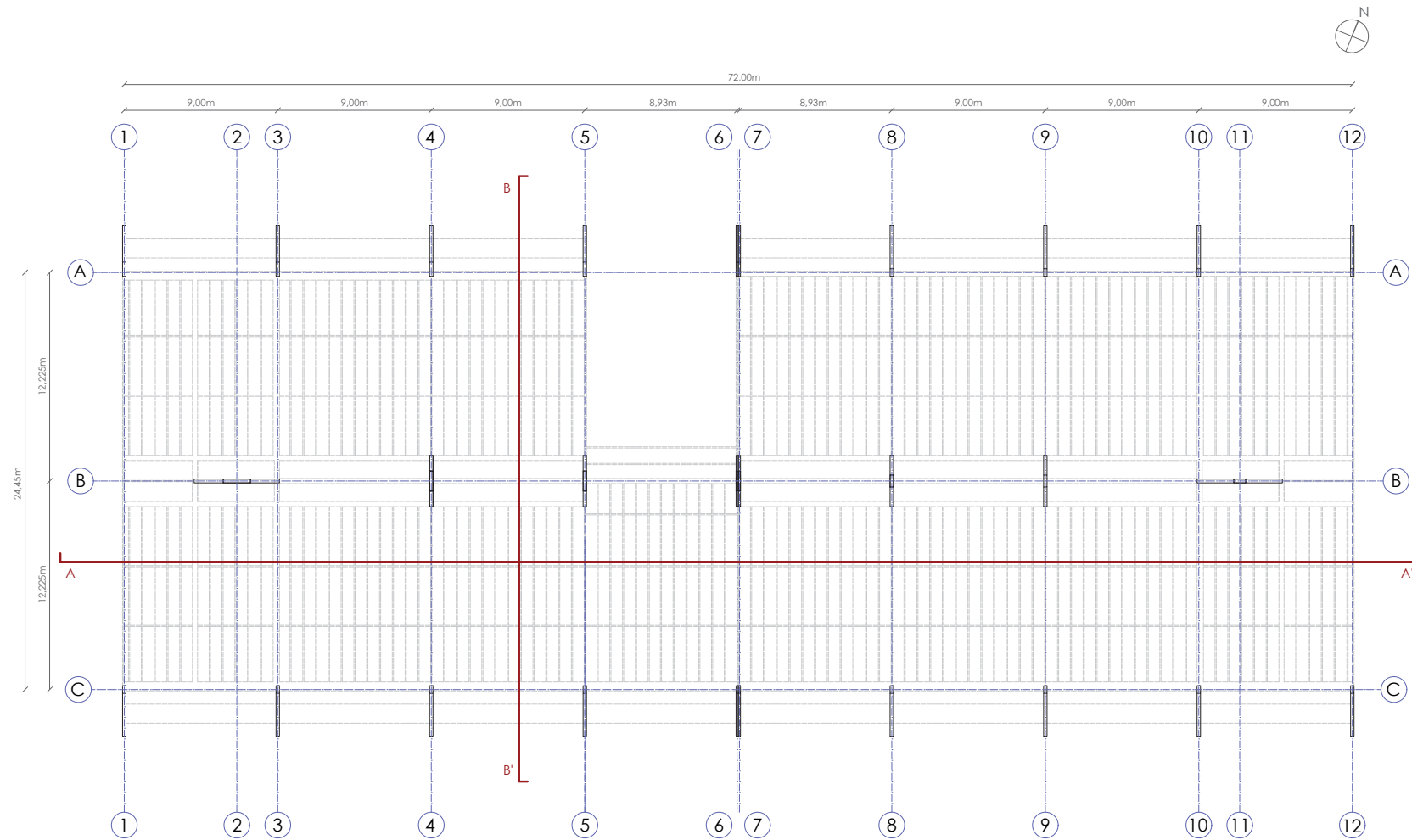


Figura 3.62. Planta de cubiertas estructural del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Elaboración: Dibujo del autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959)

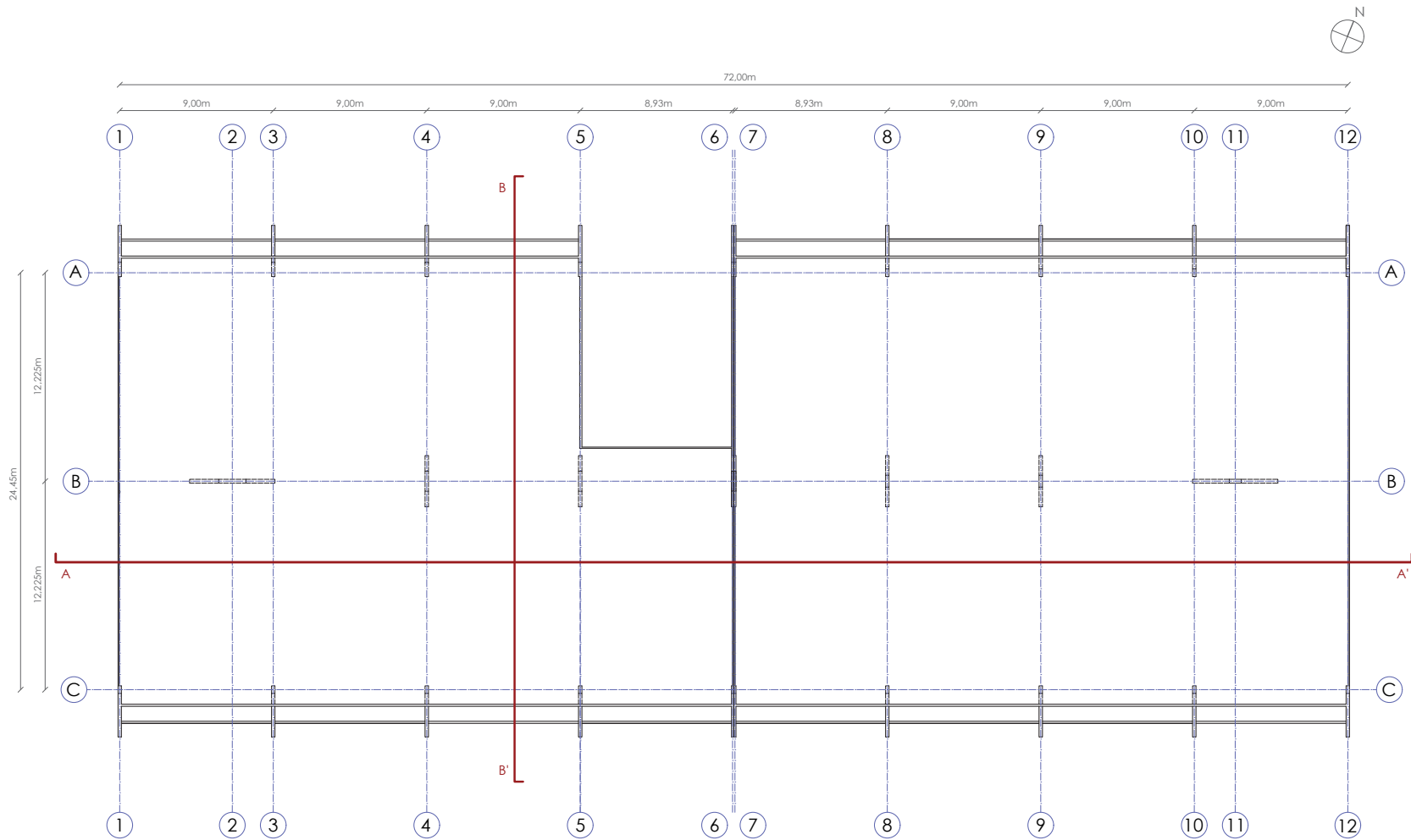


Figura 3.63. Planta de cubiertas del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Elaboración: Dibujo del autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959)



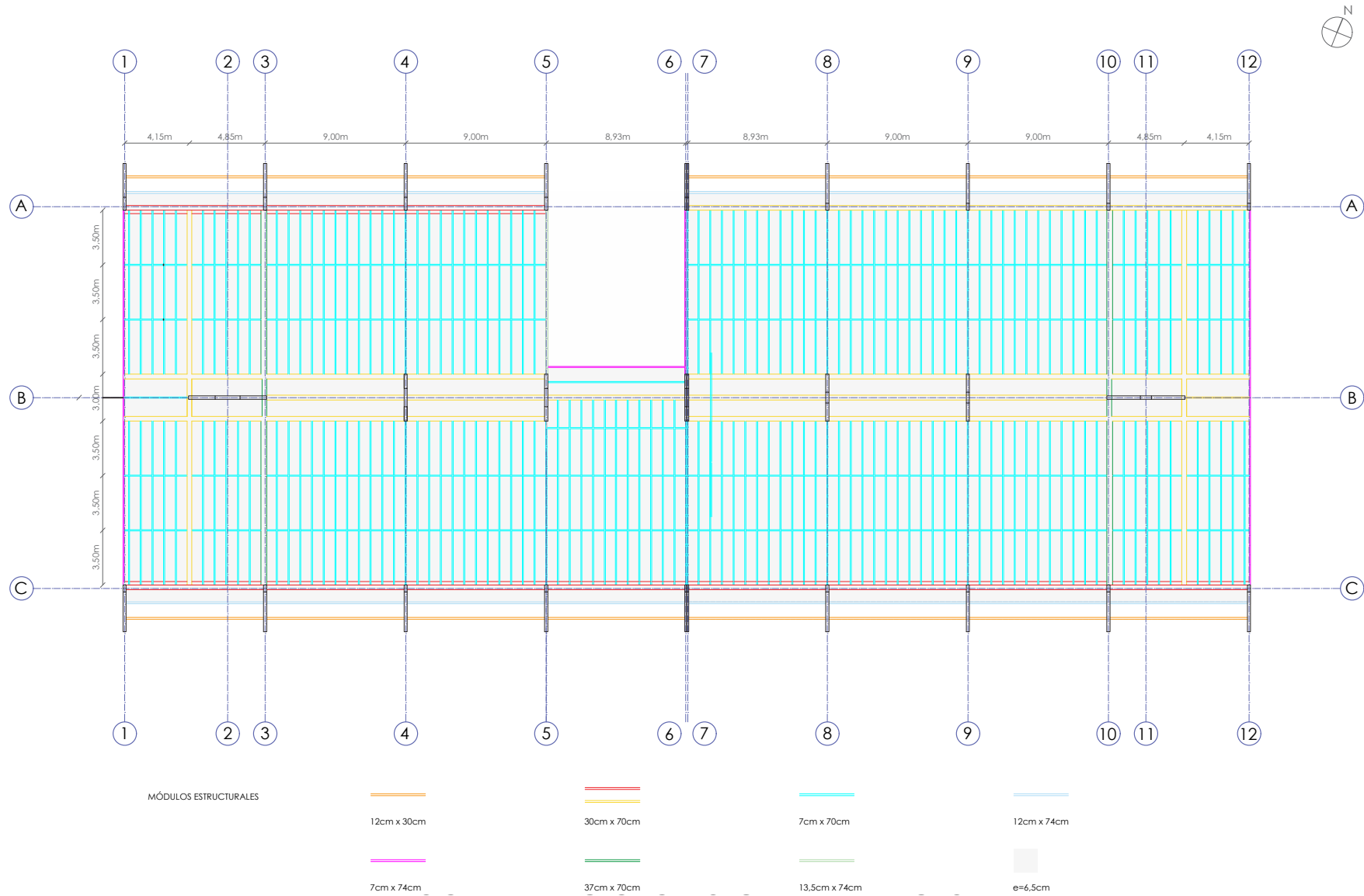
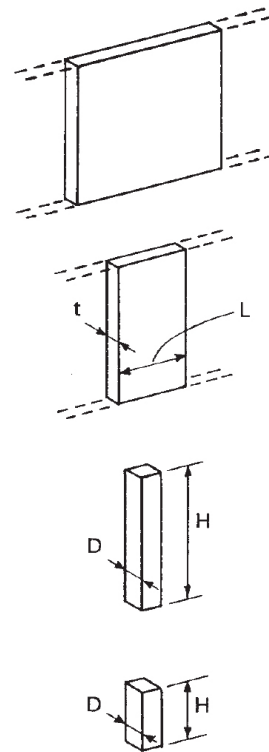


Figura 3.64. Módulos estructurales de la planta de cubierta del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc.1:350

Elaboración: Dibujo del autor a partir de información del Instituto de Previdência do Estado de São Paulo. Assistência Técnica de Engenharia (1959)

arquitectónico, que determina una malla estructural, difiere de la solución llevada a cabo en la cubierta. Aquí, distintos módulos estructurales fueron utilizados, en lo que parece ser más una decisión de los ingenieros estructurales de resolver las dificultades que planteaba el pórtico en la construcción de la cubierta. Es así como decisiones arquitectónicas como el recorte generado en la cubierta, la longitud de la edificación y los pilares perpendiculares a la estructura han implicado el aumento en el número de módulos para que la ejecución de la estructura sea factible.

En el Gimnasio Estatal de Itanhaém, la continuidad en su sistema estructural y constructivo son consecuencia del sistema constructivo en hormigón armado *in situ*. La unidad estructural utilizada, según la clasificación de Engel (2001), corresponde a pórticos de un vano y varios vanos. En ellos, la sección y forma de los soportes utilizados en la configuración del pórtico, dificulta ubicar el “nudo” característico de un sistema estructural tectónico. Es esta particular forma trapezoidal, la que permite una lectura del soporte—de acuerdo a la clasificación de columnas de concreto (Fig.3.65) de Ambrose & Tripeny (2016)—, como un elemento que transfiere la carga de manera puntual como ocurre en una columna, pero que sin embargo su sección cuando se encuentra con la losa de cubierta, adquiere la forma de una pared o placa que transmite la carga de manera lineal, enmarcándose de esta manera como construcción estereotómica.



(a) Pared

Sin límites específicos, excepto los siguientes.

(b) Pilar de pared

Longitud (L) mayor que $3t$, pero igual o menor que $6t$. Si es menor que $3t$, es una columna.

(c) Columna

Altura (H) igual a $3D$ o mayor.

(d) Pilar o pedestal

Altura menor a $3D$.

3.4.1.4 Análisis estructural

3.4.1.4.1 Construcción del modelo

El modelo construido del Gimnasio Estatal de Itanhaém emplea casi en su totalidad elementos bidimensionales, a excepción de las vigas en “L” y vigas-canal, ocupadas en los extremos del edificio.

En el caso de éstos últimos a partir del cálculo de su centroide, se configuró el mallado de los pilares con los que se conectaba. Se decidió utilizar estos elementos debido a que su representación hubiese alterado el mallado de los pilares, además de aumentar en gran número el total de elementos, cuando el total utilizado fue de 195 elementos.

La representación de los pilares prescinde de la porción de la columna enterrada de acuerdo a la cota donde su ubica. Es así, que, estos elementos son “cortados” para entender la verdadera dimensión del pilar que trabaja debido al empotramiento; se utilizaron emplearon 1128 piezas, no mayores a $0,65 \text{ m}^2$, para la representación de estos elementos.

En relación a las vigas se utilizaron también elementos bidimensionales. Así, aquellas vigas que amarran los pilares “A1-C1”, “A6-B6”, “A7-B7” y “A12-C12”, es decir, aquellas que se sitúan en la periferia del edificio, dada su condición de borde, mantienen su peralte original de 74 centímetros. Mientras que, en todos los demás elementos de sección rectangular que componen la losa, su altura ha disminuido la mitad del espesor de la losa con la que se conecta, pasando así de 70 a 66,75 centímetros. Se utilizaron 6085 elementos entre vigas y nervios, de hasta $0,57 \text{ m}^2$.

Figura 3.65. Clasificación de los elementos de concreto a compresión

Fuente: Ambrose, J. & Tripeny, P. (2016), pp. 501. Recuperado de: <https://b-ok.cc/book/2698809/a45117>

Al considerar vigas y columnas como elementos que estructuran una retícula, se define entonces la cubierta, compuesta por 5600 elementos de superficies correspondientes hasta 0,63 m².

A partir de información histórica del proyecto estructural proporcionada por el arquitecto brasileño Apoena Amaral, fueron identificados dos módulos de resistencia a la compresión del hormigón. El primero corresponde a la cubierta, siendo éste de 180 kg/cm², mientras que el de 210 kg/cm² se ocupó para el resto de la estructura. En el caso del primero, el módulo de elasticidad es de 19.750,06 MPa, mientras del segundo 21.332,51 MPa.

Para el coeficiente de Poisson fue utilizado el valor de 0,2, la densidad del hormigón empleada es de 0,0024 MN/m³, y la carga viva de 0,001 MN/m², según la norma *NEC-SE-DS* (2014).

Los grados de libertad de la edificación han sido establecidos, al considerar la estructura como empotrada en aquellos puntos donde los pilares se encuentran con la losa de piso, razón por la cual se ha restringido su movimiento y rotación en dirección “x”, “y” y “z”, de manera que la simulación de su comportamiento en el análisis modal y espectral se corresponda a la realidad.

La función del espectro de Brasil, necesaria para la determinación de esfuerzos y deformaciones por cargas sísmicas, fue elaborada por el Ing. Hernán García. En ella se consideran los siguientes valores de acuerdo a la norma brasileña *Projeto 02:122.15-001* (2006) relacionada al *Proyecto de estructuras resistentes a sismos*.

En el estado de São Paulo—que según el mapa de aceleración sísmica horizontal de Brasil se ubica en la “zona 0”—, la aceleración espectral es de 0,025g. A partir de esta aceleración espectral, el valor de C_a —factor de amplificación sísmica del suelo para el período de 0.0s—es igual a 2,5 y C_v —factor de amplificación sísmica del suelo para el período de 1.0 s—es igual a 3,5 para una clase de terreno tipo “E” o suelo blando, ya que el suelo de la zona donde se ubica el gimnasio está constituido por “sedimentos de corriente y subcorriente” (CBH-BS, 1999).

3.4.1.4.2 Interpretación del modelo

a) Análisis modal

Modo 1. En relación al primer modo de vibrar—al que le corresponde un periodo de 0,603s—, se evidencia movimiento lateral longitudinal (Fig.3.66)

Se observa que el pilar “A6” y la viga que conforman el pórtico “A6-B6” como los elementos más vulnerables del sistema estructural consecuencia del movimiento de la estructura que origina la flexión de la viga y la torsión de este pilar periférico. Se aprecia además como los pilares “C6” y “C7” tiende a unirse en razón de este movimiento.

En los tres últimos pórticos de cada extremo, el comportamiento de la estructura difiere de lo que ocurre a partir de los subsiguientes pórticos, esto es: movimiento lateral transversal. Esto ocasiona que los pilares centrales que se disponen en sentido longitudinal, se pandeen; efecto que es más notorio en el pilar “B11”. Es evidente también la flexión de los pórticos de los extremos que no cuentan con un apoyo

central como el resto de las unidades estructurales.

Los modos de vibrar 3 y 5 son similares, aunque los desplazamientos se expresan en menor medida.

Modo 2. En este segundo modo el movimiento de ambos bloques del gimnasio es en dirección “Y”, y su periodo es el mismo del primer modo de vibrar. Los efectos de la estructura a partir de este movimiento se aprecian en la flexión en “s” de viga de los pórticos de los extremos que ondula la losa (Fig.3.67).

Producto de este movimiento, la viga comprendida entre los pilares “A6” y “B6” se deforma al comprimirse y ocasiona la torsión del primer pilar. A partir de este tipo de movimiento se observa también como los elementos lineales que representan las vigas canal se encuentran trabajando, en mayor medida en el eje “A”.

Se advierte también que este movimiento ocurre en mayor medida en los sectores donde se sitúan los pilares que se orientan en sentido longitudinal y a medida que se acerca al centro este movimiento disminuye. Es precisamente en estos elementos de soporte en los que se observa más claramente el efecto de pandeo.

Modo 4. Este modo de vibrar—cuyo periodo es de 0,524s—ocurre a partir del desplazamiento en “X” del bloque izquierdo, aunque este comportamiento se advierte a partir del pórtico “A6-B6”, que se caracteriza por el movimiento conjunto de esta viga y el pilar “A6” (Fig.3.68). El quinto modo de vibrar presenta un comportamiento similar, y le corresponde un periodo de 0,515s.

Modo 6. El sexto modo de vibrar ($T=0,355s$) se aprecia claramente a partir de la junta constructiva, y de esta

manera se percibe el movimiento de la estructura comprendida entre los pilares “A7”, “C7”, “C12” y “A12”. Los mayores desplazamientos relativos surgen en torno al pilar “B11”. Mientras el resto de pórticos se desplaza en el sentido que se origina el movimiento, la zona comprendida entre los pórticos “A10-C10” y “A12-C12”, se comporta de manera distinta debido al sentido del pilar “B11”, ocasionando una “ondulación” en la losa (Fig.3.69).

Modo 7. Se diferencia del cuarto modo en el movimiento alternado del pilar “A6” respecto a la viga que se amarra (Fig.3.70), y que tiene un periodo de 0,307s.

Modo 8. El octavo modo ($T=0,291s$) corresponde al movimiento torsional en el bloque derecho. La cubierta se deforma en forma de “s” producto de este movimiento, y se acentúa en los extremos y de especial manera a partir del pilar “B11” (Fig.3.71).

Modo 9. El gimnasio, en su bloque izquierdo, se desplaza en “X”. El comportamiento de este bloque es similar al ocasionado por el sexto modo de vibrar, sin embargo, la viga que amarra a los pilares “A6” y “B6” sufre varias deformaciones a lo largo de su eje, a diferencia de la viga que conecta los pilares “B6” y “C6” (Fig.3.72). Este modo se caracteriza por un periodo de 0,255s.

Se puede observar también que las vigas canal que amarran los pilares “A1”, “A3”, “A4” y “A5”, se deforman más que aquellas que amarran los pilares “C1”, “C3”, “C4”, “C5” y “C6”.

El bloque derecho mientras tanto se desplaza de noroeste a sudeste, lo que provoca el pandeo del pilar

“B11”.

Modo 10. En este modo de vibrar—de periodo igual a 0,251s—ambos bloques se desplazan diagonalmente de izquierda a derecha. En el bloque derecho no se advierte el pandeo de ningún pilar, mientras que en el bloque izquierdo el pilar “B11” se pandea (Fig.3.73).

Los modos 11 ($T=0,25s$) y 12 ($T=0,24s$) se expresan de manera muy similar al modo 10.

Modo 13. Ocurre un movimiento torsional en el bloque izquierdo de la estructura. El comportamiento es similar al modo 8, sin embargo, los elementos sujetos a mayores deformaciones son el pilar “A6” que muestra una clara torsión, y la viga que se amarra a este pilar presenta una deformación en forma de “s” con respecto a su eje longitudinal (Fig.3.74). A este modo le corresponde un periodo de 0,226s.

El comportamiento de la estructura en los modos 14 ($T=0,215s$) y 15 ($T=0,189s$) es similar al modo 13, aunque con menos desplazamientos relativos en “X”.

Modo 16. Se trata de un movimiento torsional en el bloque derecho como ocurre en el modo 8, aunque en sentido contrario. Ahora la mayor deformación en la cubierta ocurre claramente en el pórtico próximo a la junta constructiva. Además, debido al sentido de la rotación, el pilar “B11” se encuentra sujeto a torsión (Fig.3.75). Su periodo es de 0,188s.

Modo 17. Recién en este modo—de periodo igual a 0,163s— vuelven a aparecer desplazamientos predominantes en la dirección “Y”. El mayor movimiento se expresa en las regiones comprendidas entre los

pilares “A9”, “A12”, “B9” y “B11”, y la comprendida entre los pilares “C9”, “C12”, “B9” y “B11”. Precisamente aquí se ubica el pilar “B11”, que producto de este movimiento se pandea (Fig.3.76).

Modo 18. El comportamiento del gimnasio en este modo de vibrar ($T=0,161s$) se traduce en un movimiento en dirección “Y” del bloque izquierdo. Similar al modo 17, el movimiento más notorio sucede en el área comprendida entre el pórtico de acceso y su subsiguiente. Adicionalmente, en este modo se observa con claridad la flexión a la que está sujeta la viga que conforma el pórtico “A6-B6” (Fig.3.77).

Modo 19. El modo de vibrar ($T=0,153s$) en este caso se expresa también en el bloque izquierdo, y el comportamiento de la estructura es el mismo del modo anterior; se diferencia en que, ahora los desplazamientos relativos son más notorios. Esto posibilita entender de manera más clara el funcionamiento del pórtico como unidad estructural cuando este se desplaza en “Y”. Así, en el caso del pórtico de un vano, mientras la mitad de su tramo se encuentra comprimido, la otra mitad está trabajando a tracción; en el pórtico de dos vanos, este comportamiento de las vigas—a tracción y compresión—se manifiesta entre cada pilar (Fig.3.78).

b) Espectro

A partir de la interpolación del periodo de la estructura con el del terreno y la aceleración espectral de este último, se obtiene la función del espectro, en la que han determinados de interés los modos 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19.

El periodo y aceleración espectral de estos modos de



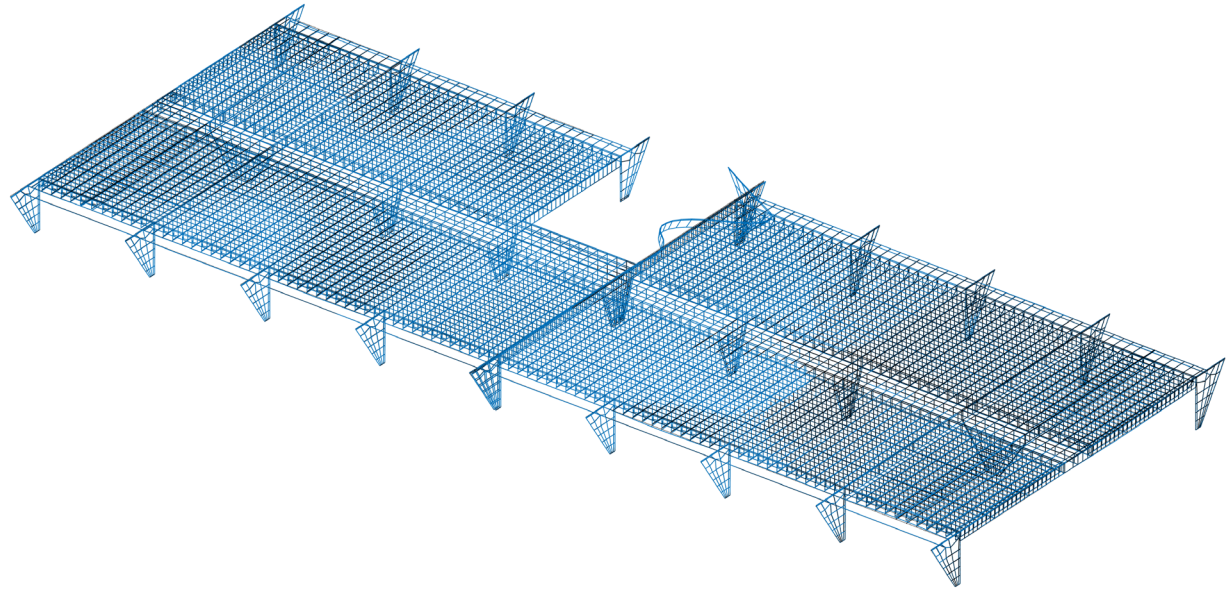


Figura 3.67. Vista general del segundo modo de vibrar ($T=0,603s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

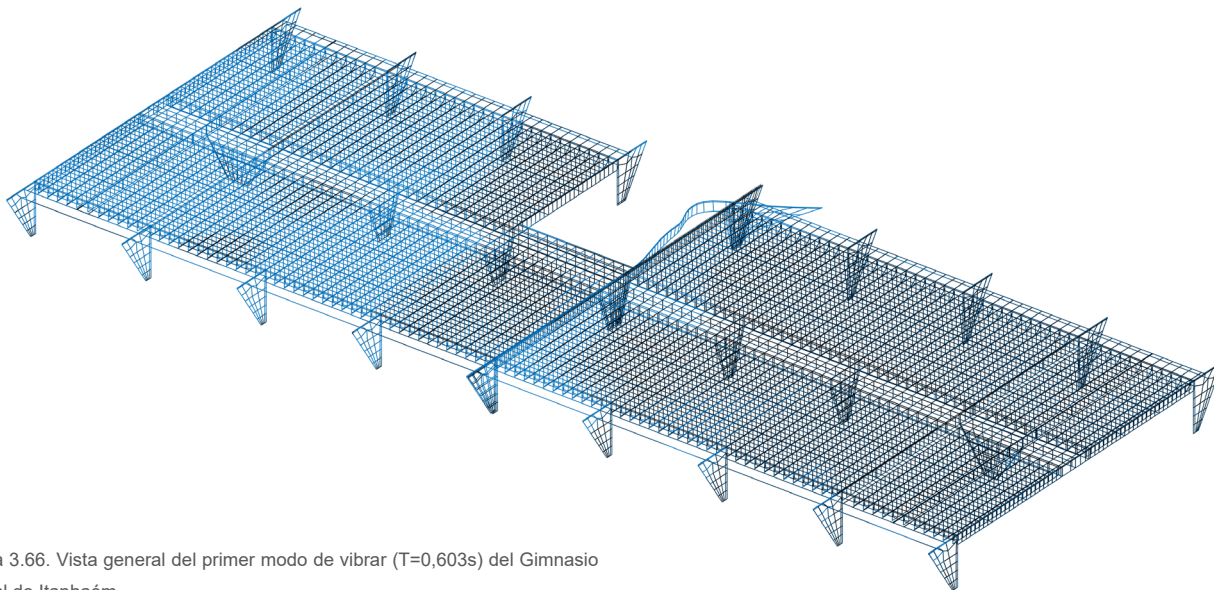


Figura 3.66. Vista general del primer modo de vibrar ($T=0,603s$) del Gimnasio

Estatal de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

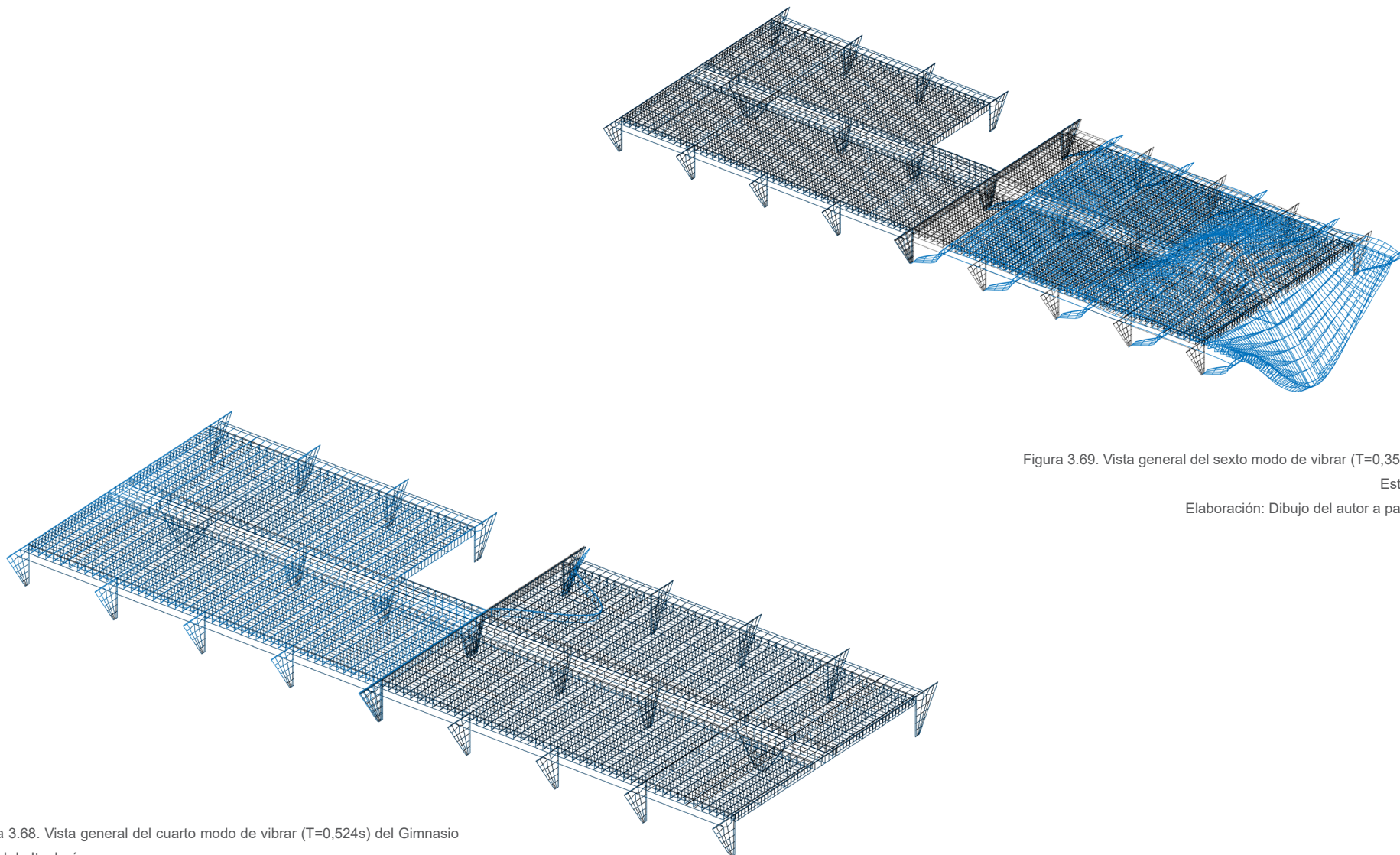


Figura 3.69. Vista general del sexto modo de vibrar ($T=0,355s$) del Gimnasio

Estatat de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

Figura 3.68. Vista general del cuarto modo de vibrar ($T=0,524s$) del Gimnasio

Estatat de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



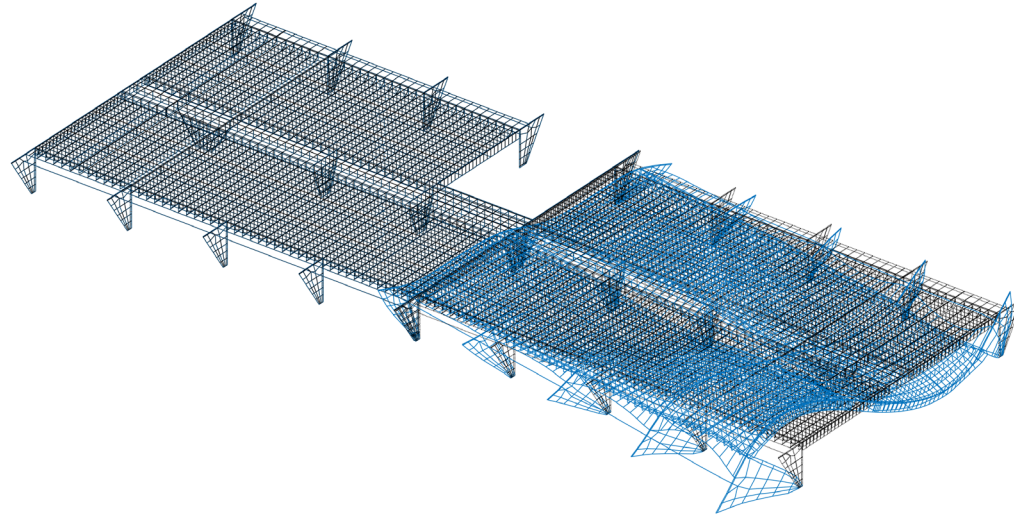


Figura 3.71. Vista general del octavo modo de vibrar ($T=0,291s$) del Gimnasio

Estatat de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

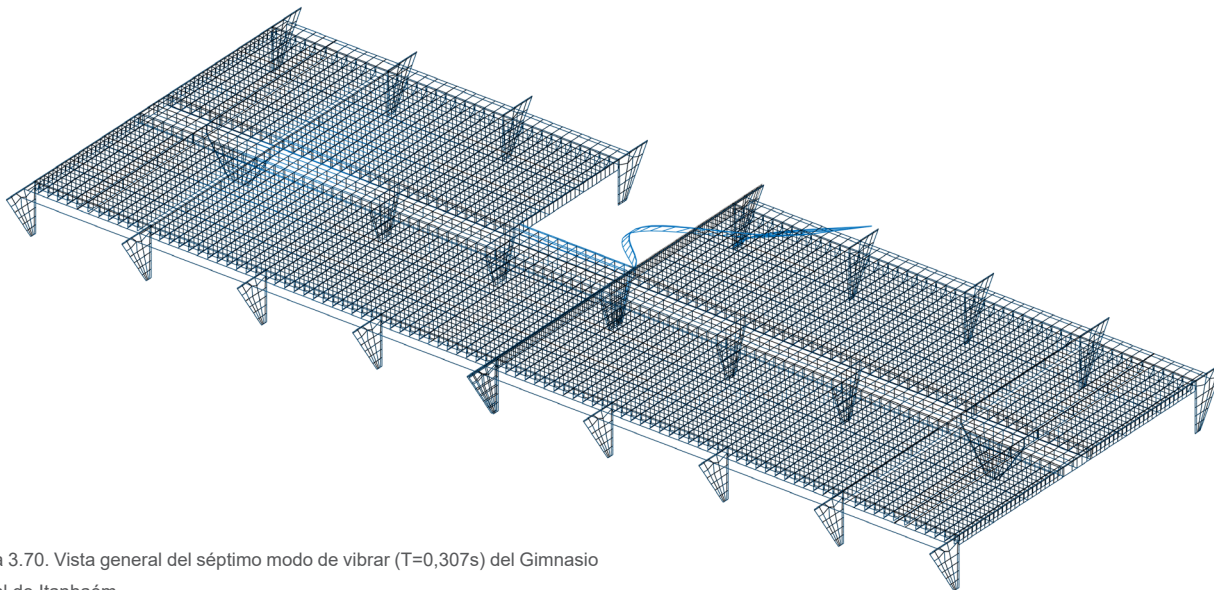


Figura 3.70. Vista general del séptimo modo de vibrar ($T=0,307s$) del Gimnasio

Estatat de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

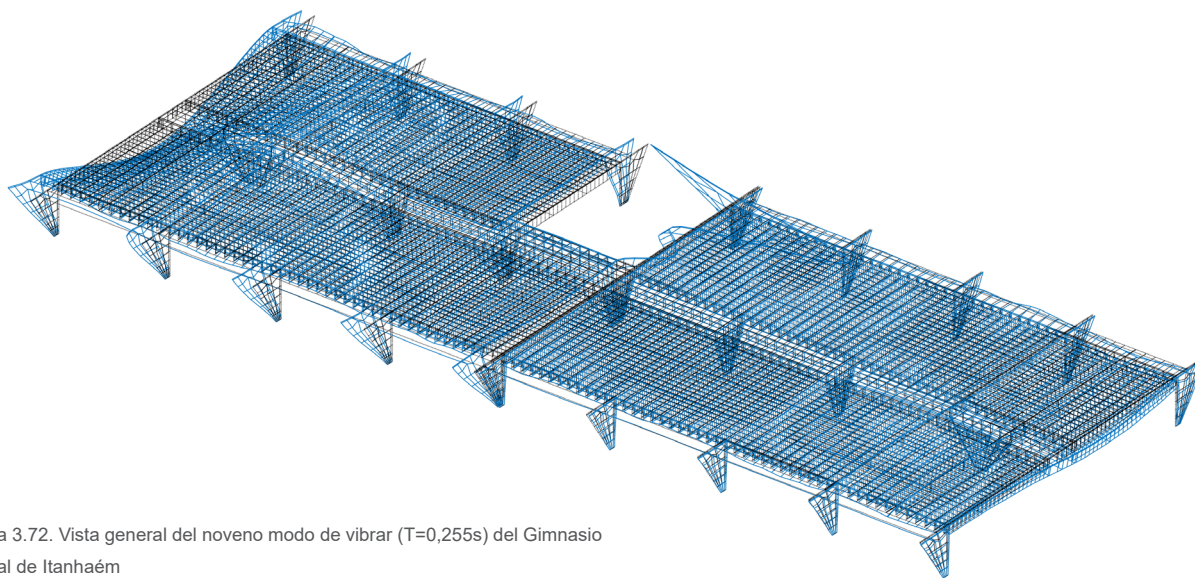


Figura 3.72. Vista general del noveno modo de vibrar ($T=0,255s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

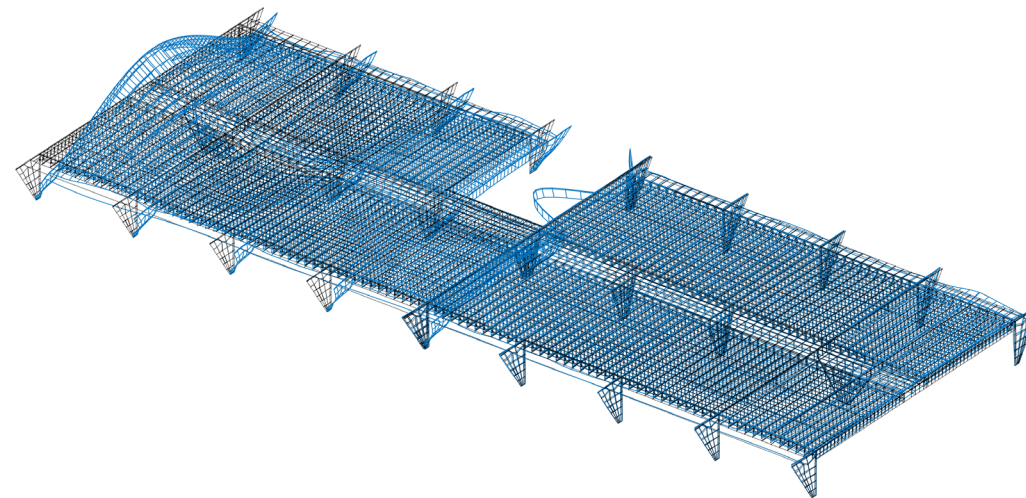


Figura 3.73. Vista general del décimo modo de vibrar ($T=0,251s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

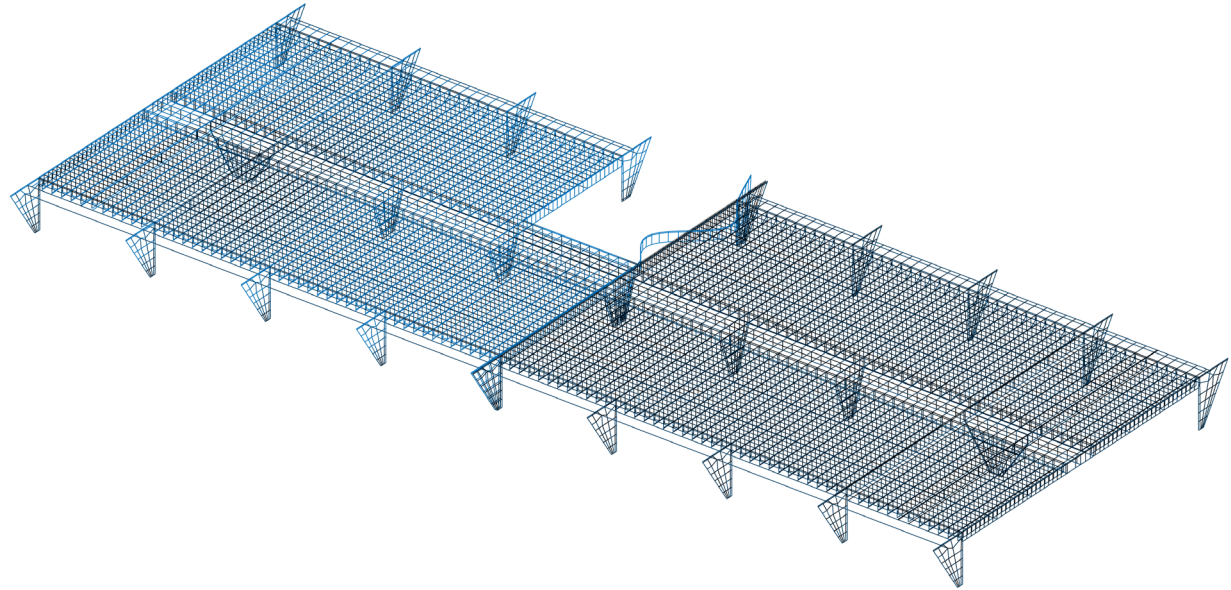


Figura 3.75. Vista general del décimo sexto modo de vibrar ($T=0,188s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

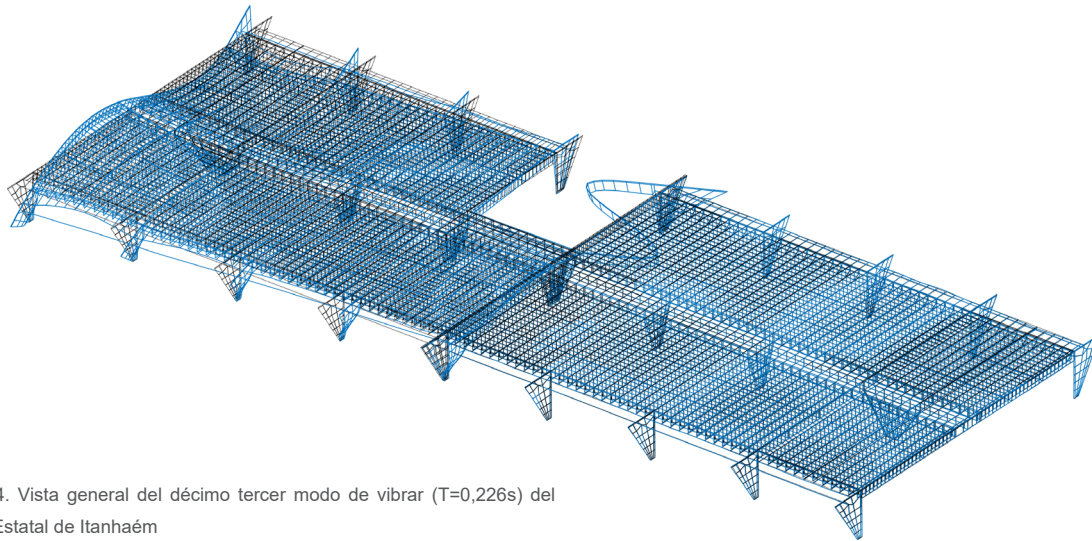


Figura 3.74. Vista general del décimo tercer modo de vibrar ($T=0,226s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

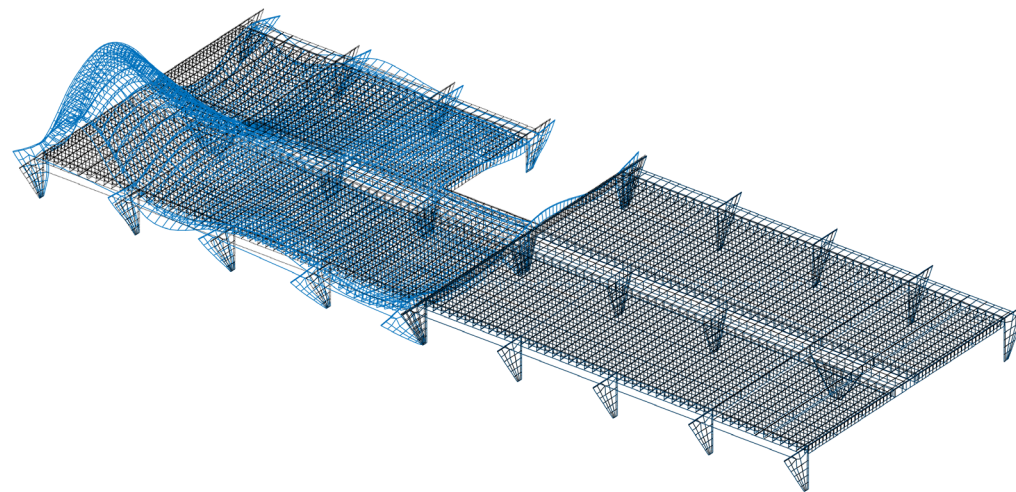


Figura 3.77. Vista general del décimo octavo modo de vibrar ($T=0,161s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

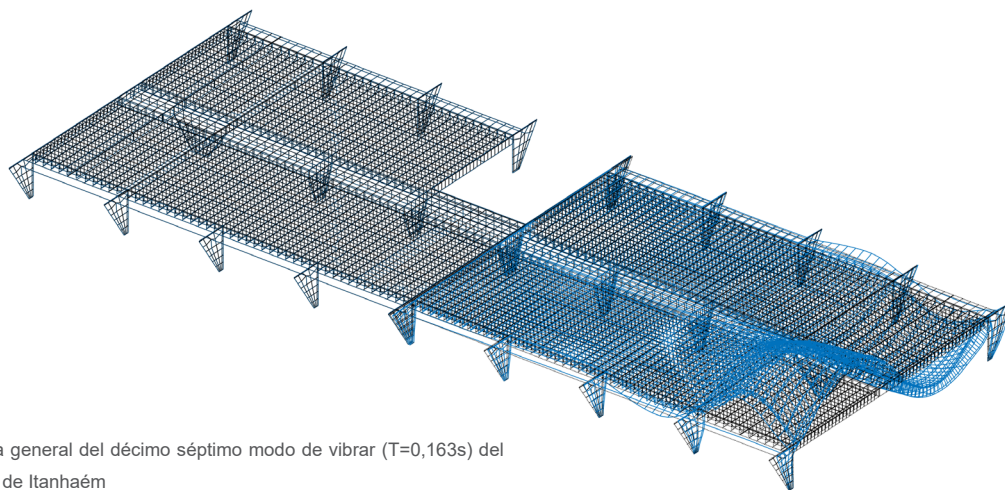


Figura 3.76. Vista general del décimo séptimo modo de vibrar ($T=0,163s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

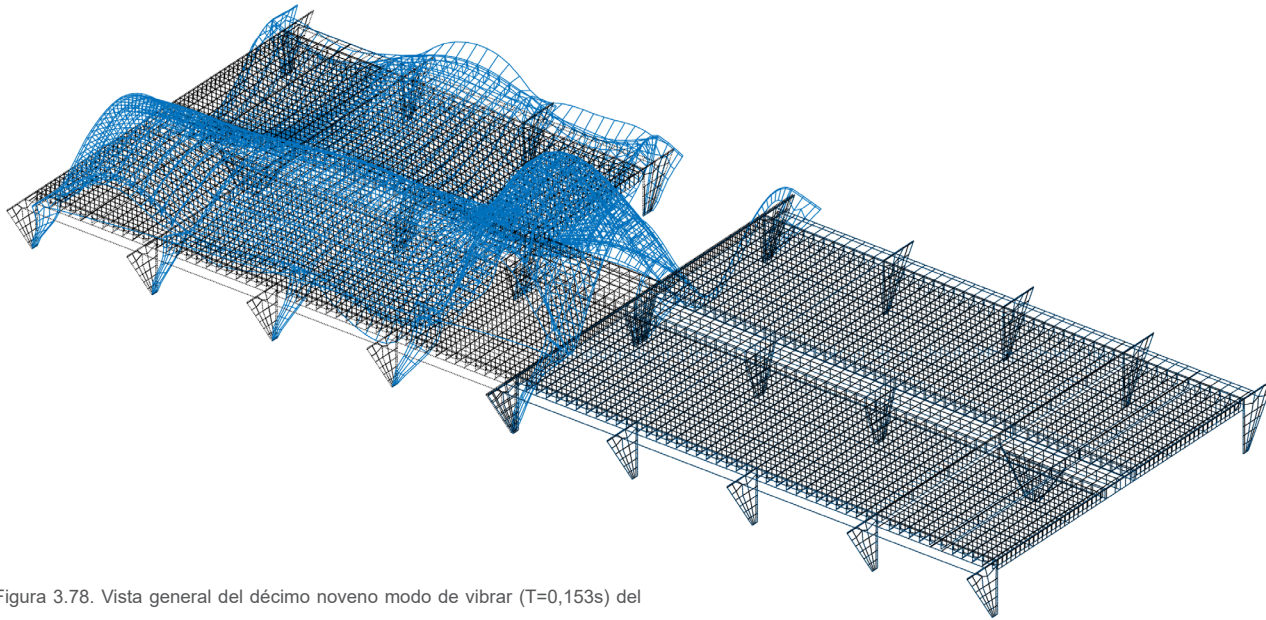
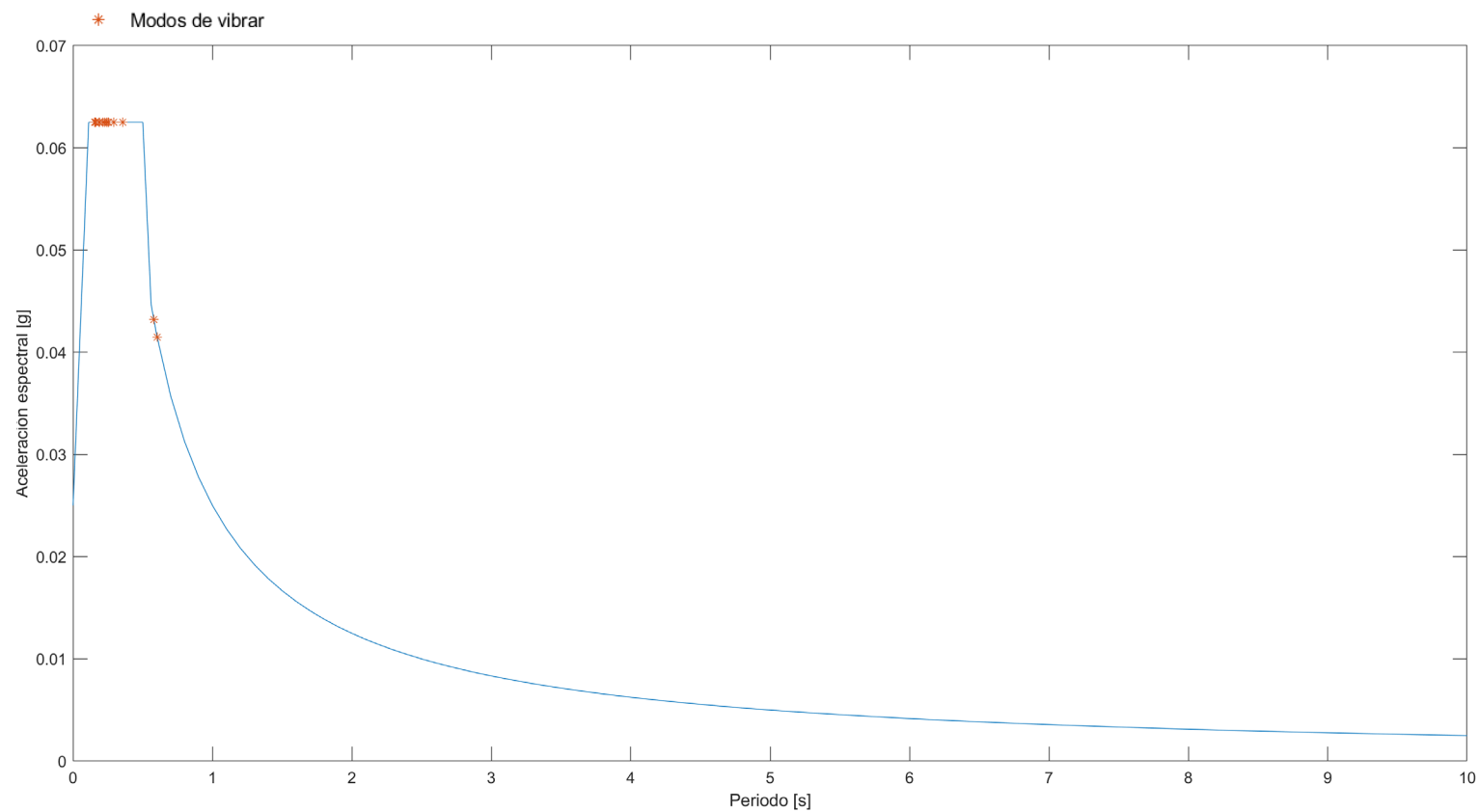


Figura 3.78. Vista general del décimo noveno modo de vibrar ($T=0,153s$) del Gimnasio Estatal de Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



NÚMERO DE MODO	PERIODO (s)	ACELERACIÓN ESPECTRAL (g)
1	0,603	0,04145
2	0,603	0,04147
3	0,579	0,0432
6	0,355	0,0625
8	0,291	0,0625
9	0,225	0,0625
10	0,251	0,0625
11	0,250	0,0625
12	0,240	0,0625
13	0,226	0,0625
14	0,215	0,0625
15	0,189	0,0625
16	0,188	0,0625
17	0,163	0,0625
18	0,161	0,0625
19	0,153	0,0625

Figura 3.79. Función del espectro del Gimnasio en Itanhaém

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



vibrar resulta indispensable para cálculo de esfuerzos y desplazamientos es presentado en la figura 3.79, a partir del cual se observa como todos los modos de vibrar a excepción de los tres primeros, alcanzan la aceleración espectral máxima.

Con estos modos de vibrar de interés, es posible determinar que la aceleración espectral máxima tiene un valor de 0,0625g igual a $0,6131 \text{ m/s}^2$ que se le imprimirá a la masa de la estructura del gimnasio.

Con respecto a esta última es preciso recordar que, debido a la junta constructiva existente, es necesario tener presente que la masa total de 1,0834 Mkg debe ser repartida en cada parte. De este modo, se calcula el porcentaje que representa cada una de sus partes en relación al todo. Es así que, la parte izquierda—en la que existe un recorte—representa el 47,22%, mientras que la otra parte el 52,78%.

Es así que, a la parte izquierda le corresponde una masa de 0,5116 MKg, mientras a la parte derecha una masa de 0,5718 MKg.

En el caso de la parte derecha la masa que participa en "X" es igual a 0,5041 MKg, lo que es igual al 88,16% de la masa en el sexto modo de vibrar, mientras que en la parte izquierda participa 0,3721 MKg equivalente al 72,73% en el décimo segundo modo de vibrar.

De este modo, la fuerza producida por el espectro en la parte derecha es de 0,309 MN y en la parte izquierda de 0,228 MN.

En el caso de la parte derecha la masa que participa en "Y" es igual a 0,2514 MKg, lo que es igual al 43,96% de la

masa en el décimo quinto modo de vibrar, mientras que en la parte izquierda participa 0,1755 MKg equivalente al 34,30% en el décimo noveno modo de vibrar.

Así la fuerza espectral en la parte derecha es de 0,154 MN, mientras en la parte izquierda es de 0,11 MN.

c) Esfuerzos normales

Esfuerzo normal "sx" en función de fuerza modal "sjx".

En la losa de cubierta ($e=6,5\text{cm}$), de esta edificación se observan los esfuerzos normales mayores en torno a los pilares. Aparecen esfuerzos de hasta 3,40 MPa, tanto en zonas donde los pilares forman parte de la unidad estructural del pórtico, como en los pilares rotados. En el espacio intermedio entre la sucesión de pórticos, existen fuerzas normales a compresión entre -0,31 MPa y -1,80 MPa.

Adicionalmente, en la cubierta, en la zona cercana al nodo donde se amarran los pilares con las vigas para conformar los pórticos de los extremos (7x74cm), aparecen esfuerzos superiores (8,61 MPa). En torno a los pilares intermedios de los pórticos de cada uno de los bloques, que se encuentran separados por la junta constructiva, los esfuerzos normales a los que están sujetos son menores en relación a lo que ocurre en el resto de la edificación. El esfuerzo más alto a compresión (10,84 MPa) en la losa de cubierta aparecen en uno de los cruces de las vigas en torno al pilar rotado "B11" (Fig.3.80).

En cuanto a las vigas que amarran los pórticos, la mayoría de su superficie refleja que resisten esfuerzos de 0,42 MPa. Esfuerzos superiores son evidentes en

las vigas (7x70cm) que amarran los pórticos de los extremos con los pilares rotados (-9,24 MPa). A partir de estos pilares precisamente, en la parte inferior donde se amarran con las vigas longitudinales (30x70cm), se presentan los mayores esfuerzos (-3,29 MPa) que disminuyen hacia el centro del elemento (0,42 MPa), y a medida que se acercan a la junta constructiva alcanzan los 3,77 MPa a tracción (Fig.3.81).

Valores similares a aquellos evidenciados en las vigas que amarran a los pilares rotados, se presentan en las vigas longitudinales (30x70cm) que amarran los extremos de los pilares de los pórticos de dos vanos. Aunque se expresan en una superficie menor, los esfuerzos alcanzan hasta los -11,48 MPa en torno al pilar "B8" (Fig.3.81).

En el peralte de los pilares rotados, cuya altura coincide con las vigas longitudinales que amarran, se observan esfuerzos de 2,65 MPa, y en el resto de la superficie del pilar, los esfuerzos en su mayoría son de -1,80 MPa (Fig.3.81).

Esfuerzo normal "sx" en función de la fuerza modal "sjy".

Aquí la distribución de los esfuerzos sigue la lógica de distribución de esfuerzos normales "sx" en función de la fuerza modal "sjy". Sin embargo, en este caso, la losa de cubierta presenta la concentración de los mayores esfuerzos (entre 1,13 MPa y 3,47 MPa) en las regiones próximas a los pilares centrales y de los extremos—donde se amarran las vigas que forman los pórticos (Fig.3.82).

Mientras tanto, el área de la cubierta que se ubica sobre

los pilares rotados, presenta esfuerzos no solo en los extremos del elemento, sino a lo largo del mismo. Los esfuerzos normales en la cubierta oscilan entre -1,87 MPa y 0,13 MPa en el espacio comprendido entre los pórticos, y entre 1,13 MPa y 3,47 MPa alrededor de los nodos de contacto entre pilares y vigas que conforman los pórticos; valor que asciende hasta los 8,49 MPa en torno al pilar "C1" (Fig.3.82).

En relación a las vigas longitudinales, los esfuerzos varían entre -11,57 MPa y 5,14 MPa, mientras que los pilares rotados muestran esfuerzos que van desde los 2,47 MPa en su parte superior hasta -2,21 MPa al llegar al suelo (Fig.3.83).

Esfuerzo normal "sy" en función de la fuerza modal "sjx".

Los esfuerzos normales de los nervios y vigas orientadas en "y" se caracterizan por variar entre 6,39 MPa—en el tramo medio del vano de cada pórtico—y 0,13 MPa. Respecto a esta unidad estructural, existen esfuerzos que alcanzan los -12,38 MPa en las vigas que se unen a los pilares, y que se torna más evidente aún en los pórticos de los extremos, al manifestarse a través de una mayor superficie en relación a los demás pórticos. Todo esto contrasta con el pórtico "A6-B6"—donde existe el recorte rectangular—en el que el esfuerzo máximo de la viga que amarra los pilares es de 2,01 MPa (Fig.3.84).

Los esfuerzos normales en la cubierta se caracterizan por ser más focalizados en los extremos de cada pilar, alcanzando valores de hasta 5,77 MPa en la zona de los pilares rotados y 3,89 MPa en los demás pilares (Fig.3.85).

Adicionalmente, es posible identificar tres zonas de esfuerzos en la cubierta. Una franja establecida por el ancho de los pilares centrales, y dos—una a cada lado—comprendida entre estos pilares y aquellos ubicados en la periferia. Mientras en el primer caso los esfuerzos son en su mayoría de 2,01 MPa, en el segundo caso los esfuerzos son esfuerzos de compresión de -1,73 MPa (Fig.3.85).

Los esfuerzos en los pilares en este caso ocurren en la región próxima donde se han amarrado con las vigas, siendo los pilares de los pórticos de los extremos los que mayores esfuerzos resisten (de 2,01 MPa hasta -14,88 MPa) (Fig.3.85).

En el encuentro entre el pilar "C6" y la viga con la que se amarra para formar el pórtico "B6-C6", el esfuerzo es de -18,64 MPa, mientras que en el encuentro entre el pilar "C7" y la viga que conforma el pórtico "B7-C7" sucede el esfuerzo normal mayor de toda la estructura, esto es 18,91 MPa (Fig.3.85).

Esfuerzo normal "sy" en función de fuerza modal "sjy"

La ubicación de los esfuerzos es la misma que el ocasionado por la fuerza modal "sjx", apenas disminuye la distribución de los esfuerzos mayores sobre las superficies. Los esfuerzos varían entre los 18,44 MPa y -17,16 MPa (Fig.3.86).

Esfuerzo normal "sz" en función de fuerza modal "sjx"

Los esfuerzos normales en "sz" se observan principalmente en los pilares, aunque en el gimnasio se

observan esfuerzos en los nervios y vigas transversales que es donde ocurren los mayores esfuerzos a tracción y compresión (17,42 MPa y -27,14 MPa). La lógica de distribución de esfuerzos en estos elementos indica que, a medida que se aproximan a los pilares, aumentan los esfuerzos, mientras que, aquellos elementos que se sitúan en la mitad del recorrido entre pórticos, soportan menores esfuerzos (Fig.3.87).

En relación a los pilares, es evidente que aquellos que estructuran los pórticos de los accesos, soportan mayores esfuerzos comparados con las demás unidades estructurales (Fig.3.88). A partir de una inspección de estos elementos se observa que sus mayores esfuerzos (8,50 MPa) se presentan en la parte baja de su unión con la viga del pórtico, mismos que a medida que se distribuyen a lo ancho del pilar se disipan hasta 1,82 MPa, mientras que en la base los esfuerzos alcanzan 7,83 MPa a compresión. El único pilar periférico cuyos esfuerzos contrastan con el resto es el pilar "A6" que presenta esfuerzos entre 1,08 MPa y -0,40 MPa (Fig.3.88).

En el caso de los pilares rotados, el pilar "B11" a partir de los mayores esfuerzos a compresión (-11,54 MPa) y tracción (4,79 MPa) situados en la base de la columna, se distribuyen hacia el resto del pilar, siendo la parte superior central la que menores esfuerzos soporta (1,08 MPa) (Fig.3.88). En el pilar "B2", la lógica de la distribución de los esfuerzos es similar al del pilar "B11", sin embargo, en este pilar el esfuerzo de compresión en la base del pilar es de -7,08 MPa, y el de tracción 0,33 MPa (Fig.3.88).

La distribución de esfuerzos en los pilares centrales de los pórticos de dos vanos, mientras tanto, es similar

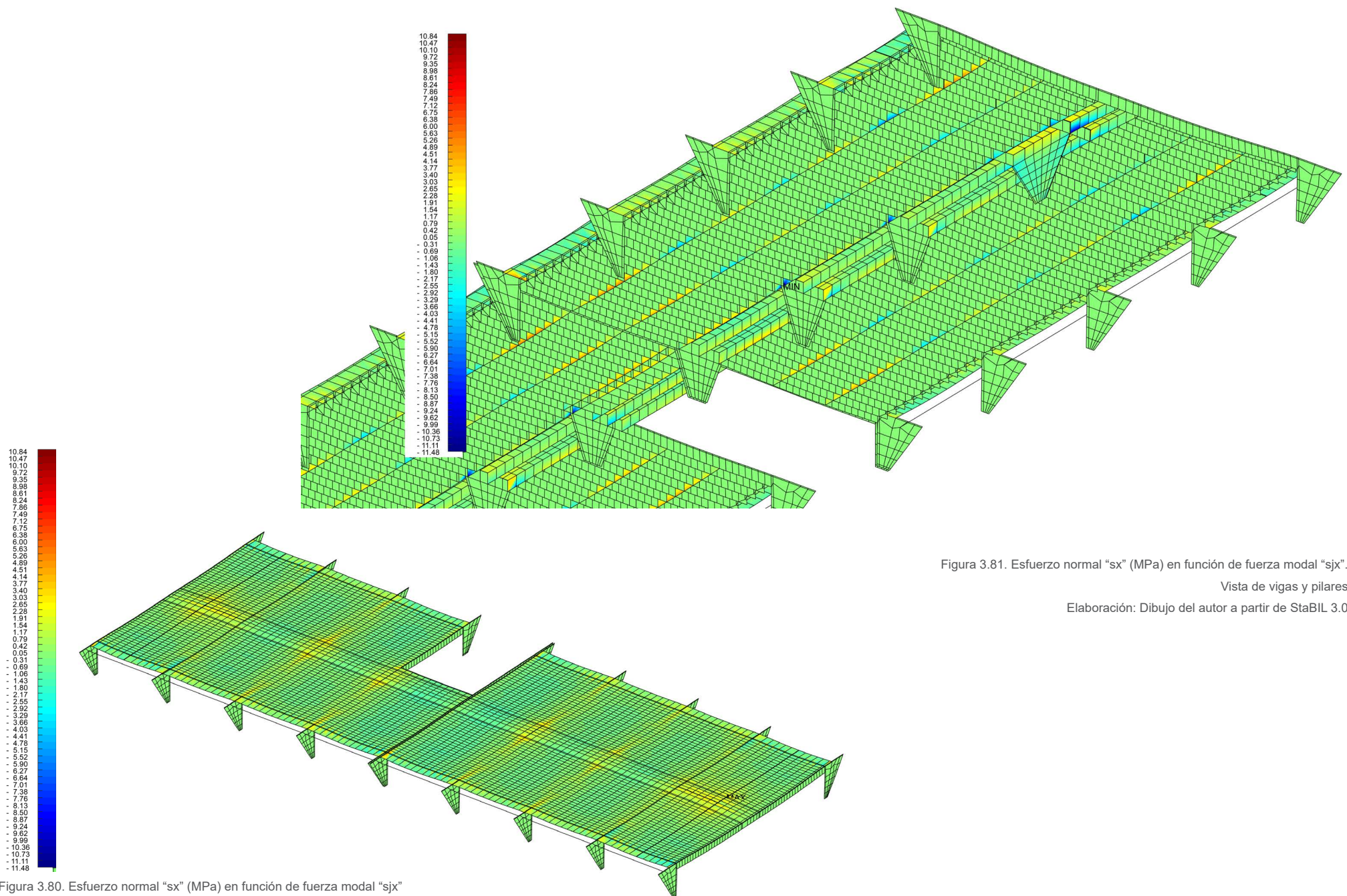


Figura 3.81. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de fuerza modal "sjx".

Vista de vigas y pilares

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

Figura 3.80. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de fuerza modal "sjx"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

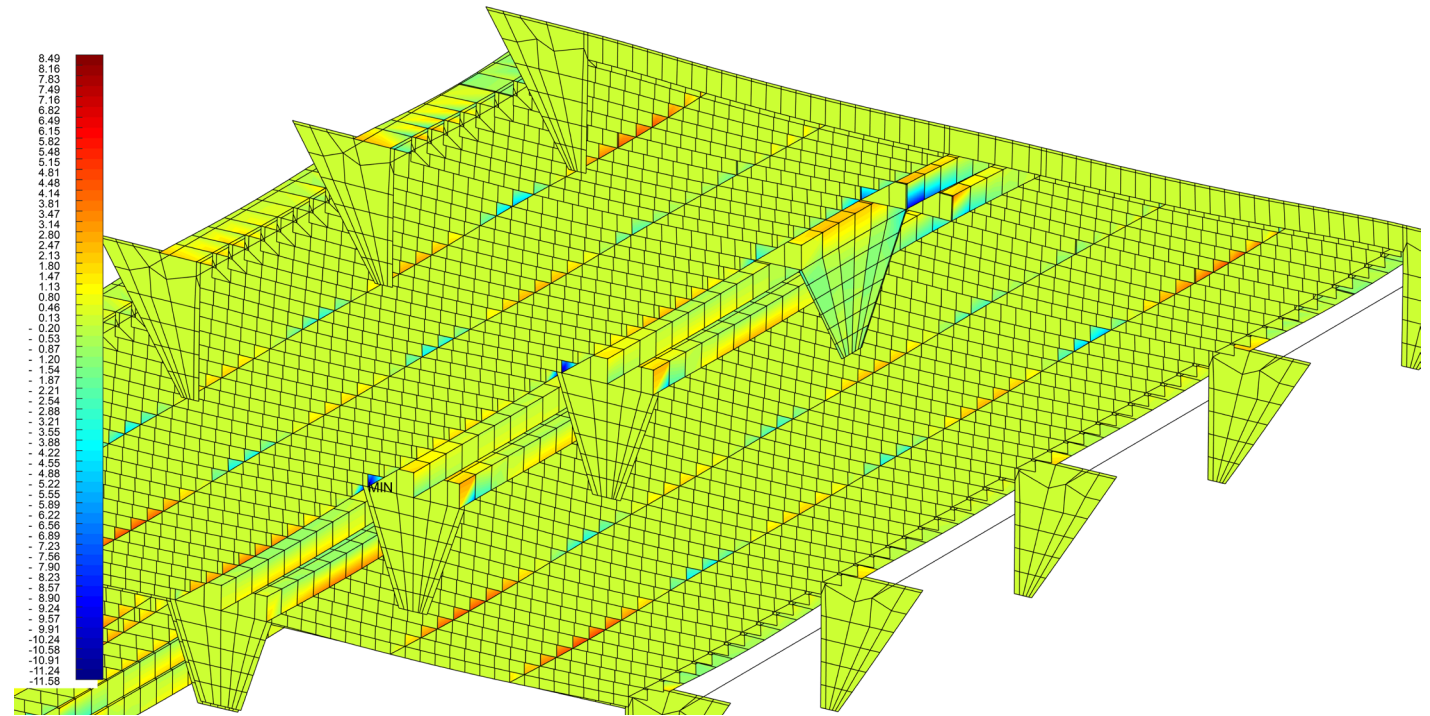
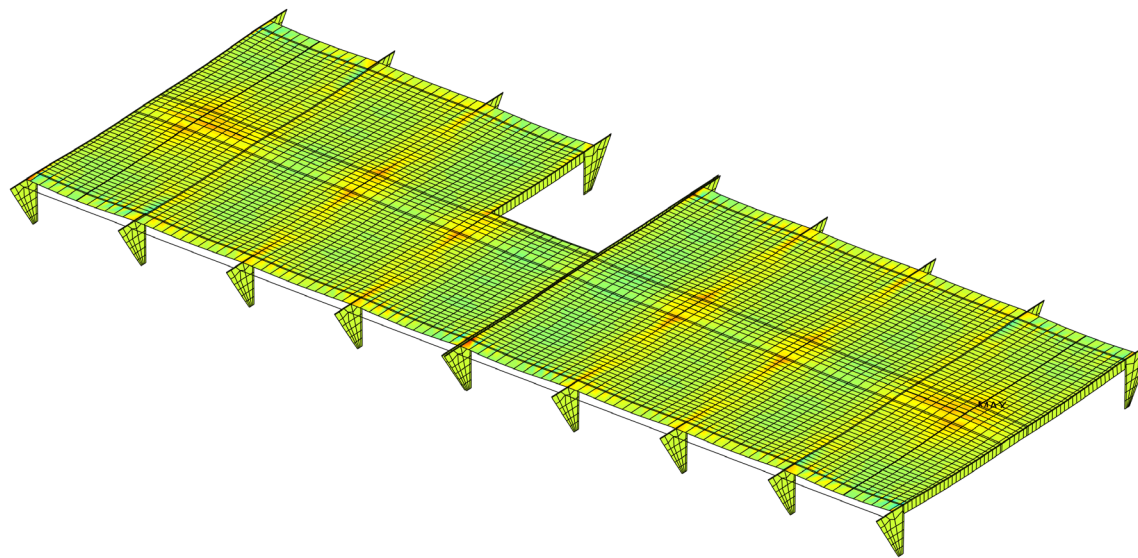
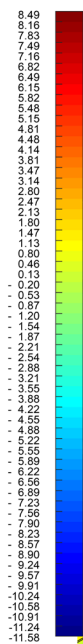


Figura 3.83. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de la fuerza modal "sjy".

Vista de vigas y pilares

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

Figura 3.82. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de la fuerza modal "sjy"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



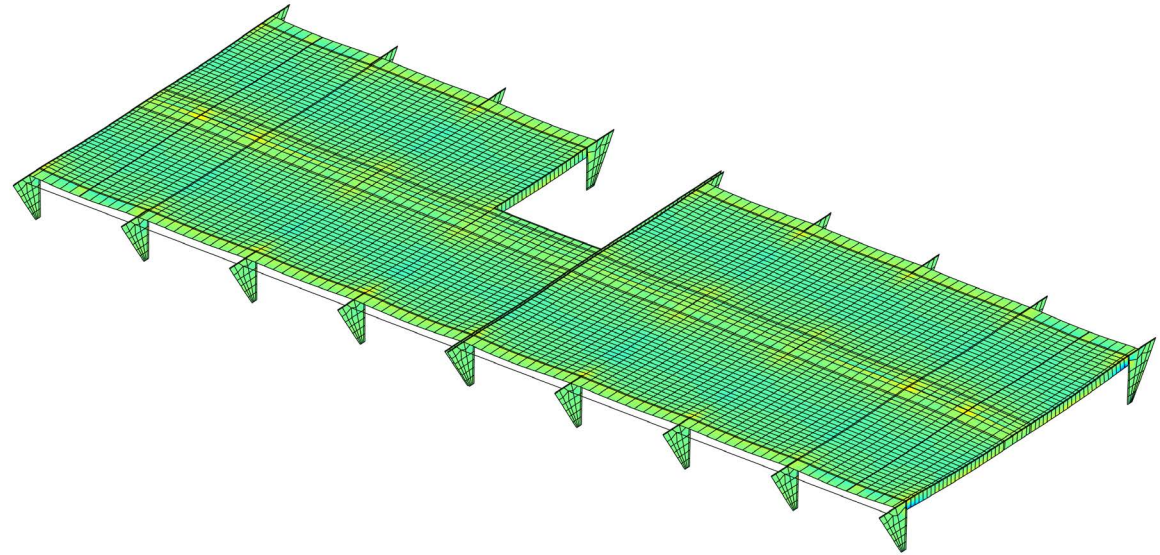
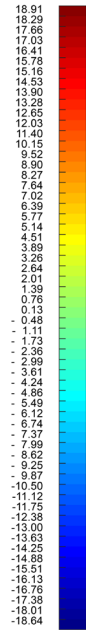


Figura 3.85. Esfuerzo normal "sy" (MPa) en función de la fuerza modal "sjx"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

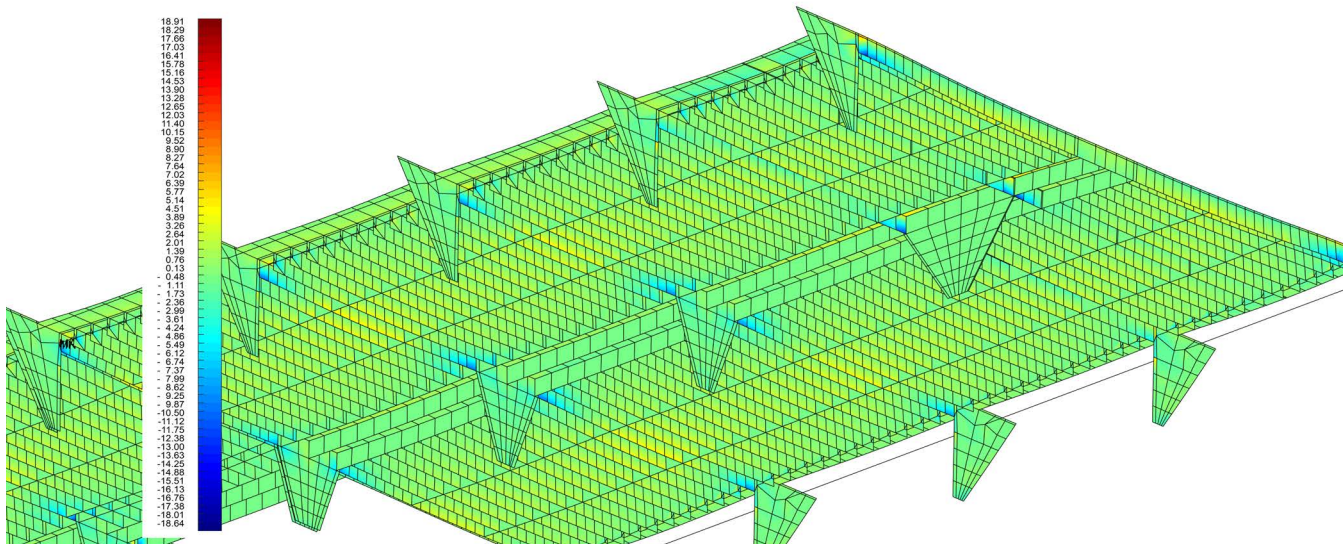
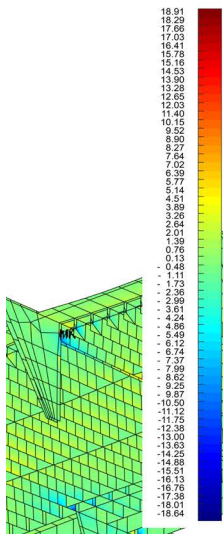


Figura 3.84. Esfuerzo normal "sy" (MPa) en función de la fuerza modal "sjx".

Vista de vigas y pilares

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

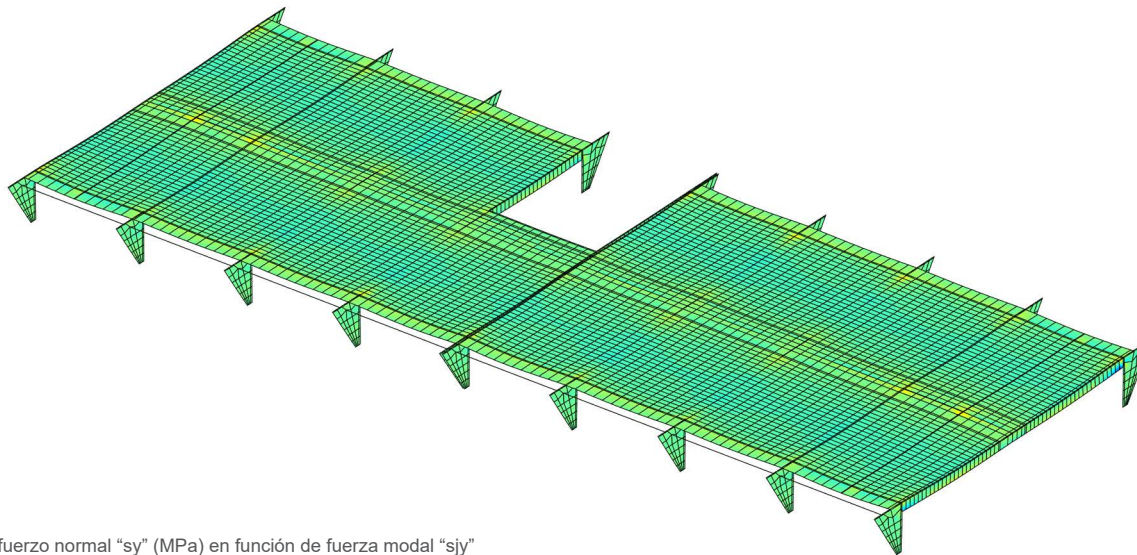
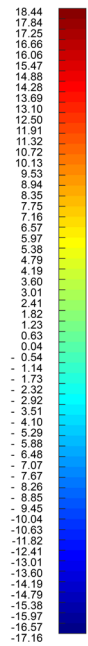


Figura 3.86. Esfuerzo normal "sy" (MPa) en función de fuerza modal "sjy"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

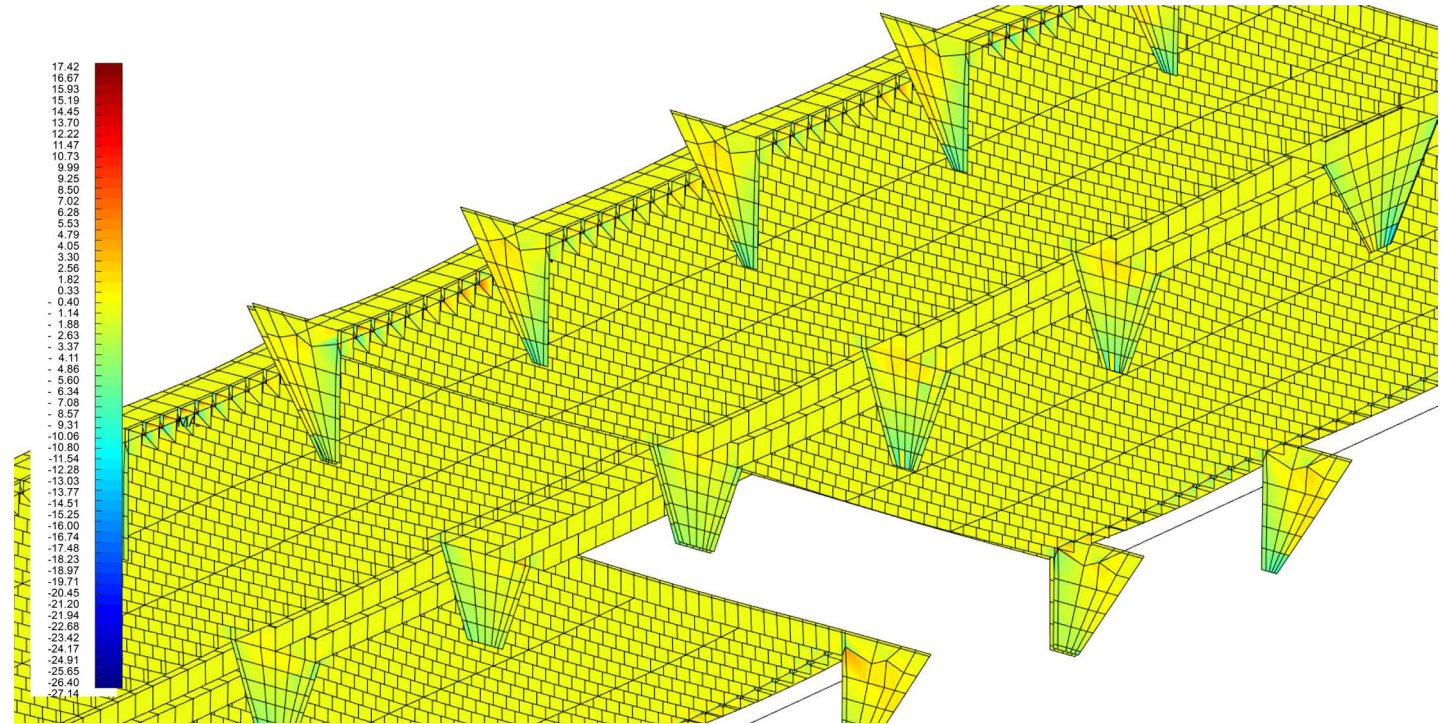


Figura 3.87. Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjx".

Vigas y columnas

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

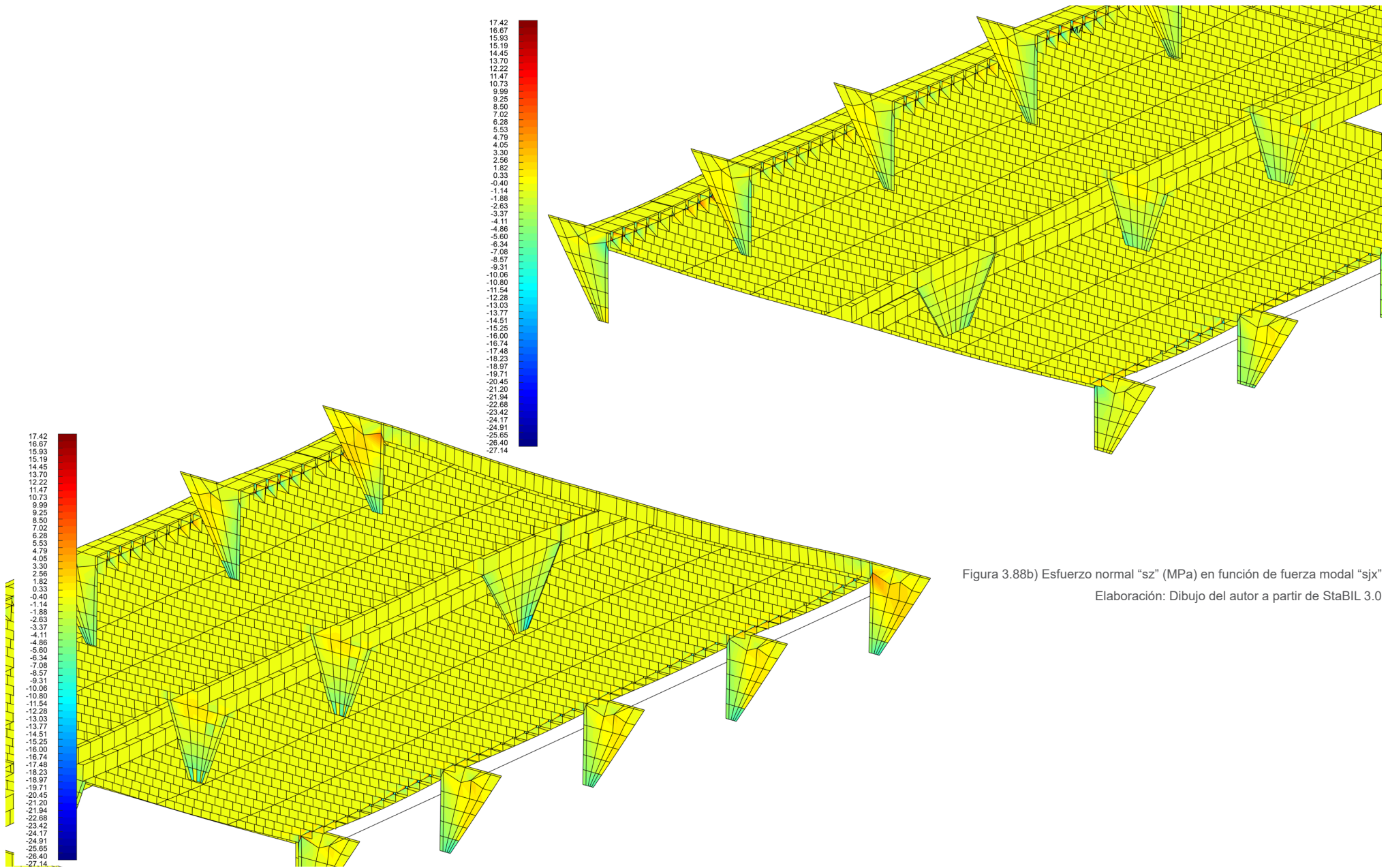


Figura 3.88b) Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjx"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

Figura 3.88a) Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjx".

Vista vigas y pilares

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

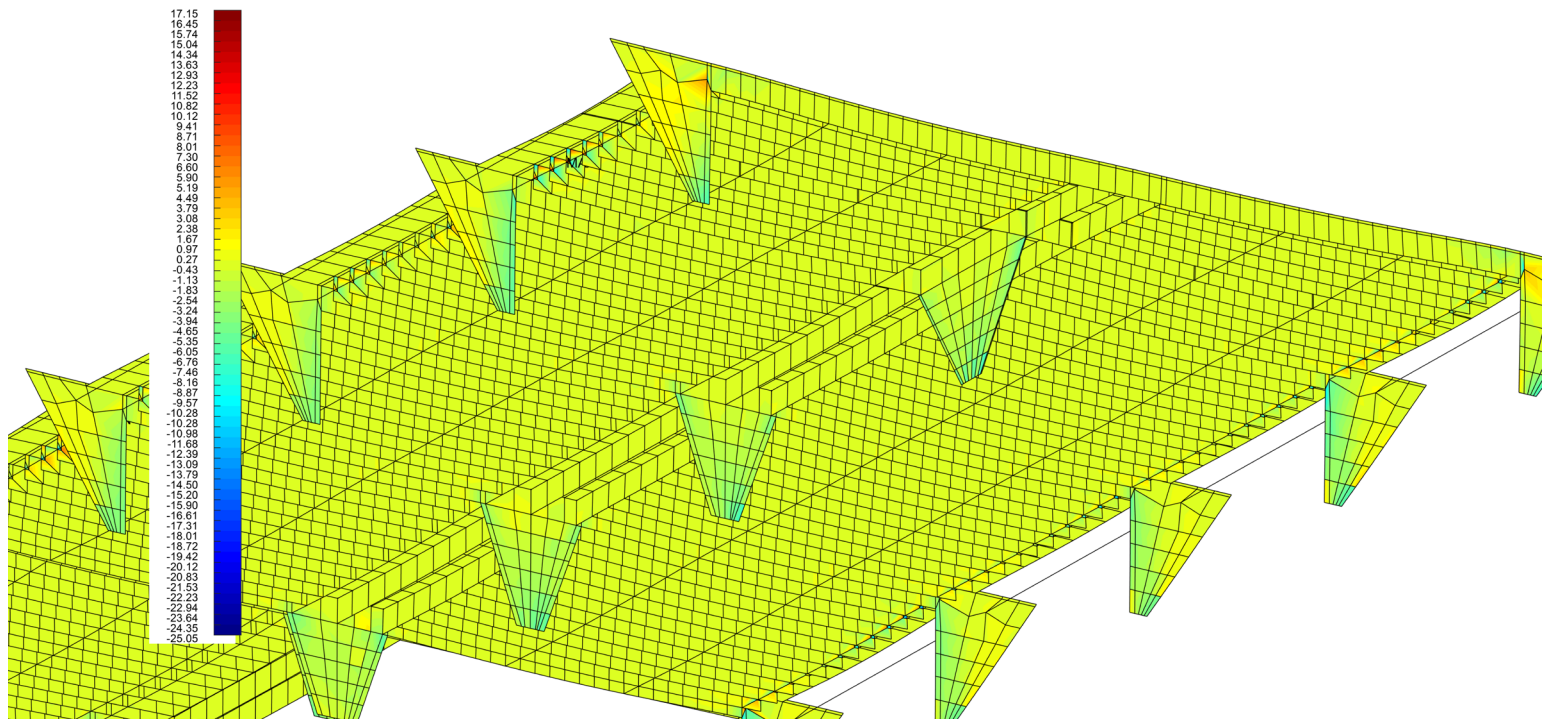


Figura 3.89. Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjy"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

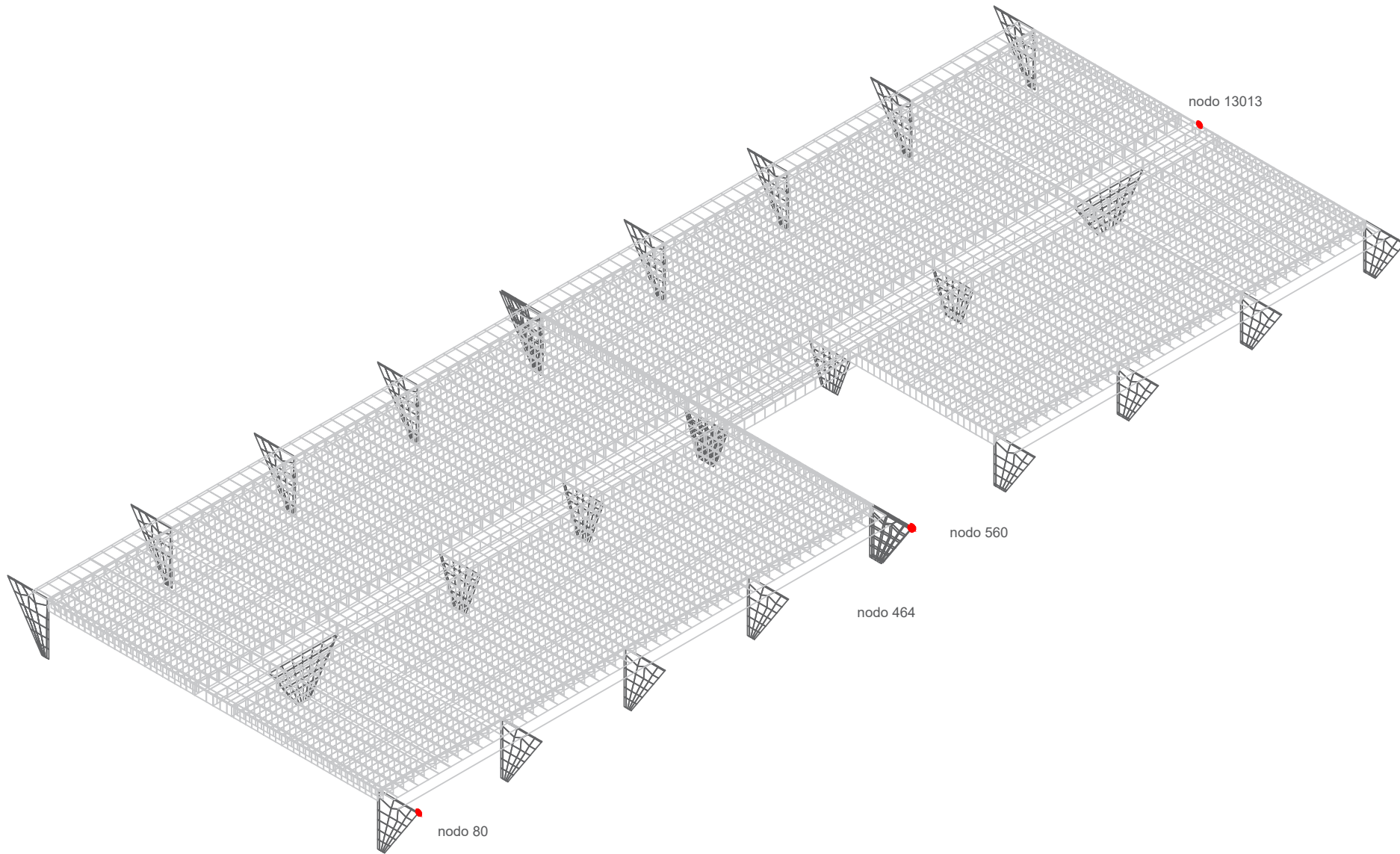


Figura 3.90. Nodos que presentan mayores desplazamientos para el cálculo de la deriva del Gimnasio Estatal de Itanhaém. Esc 1:125

Elaboración: Autor

entre aquellos de 3,29 metros y de 3,79 metros de altura. Se diferencian en que, en el caso de los segundos, su menor sección de empotramiento implica esfuerzos de -7,08 MPa en la base, mientras en la parte superior los esfuerzos alcanzan los 3,30 MPa. En los pilares de 3,29 metros de altura disminuyen los esfuerzos tanto en la base (-4,11 MPa) como en la parte alta (1,08 MPa) (Fig.3.88).

Esfuerzo normal “sz” en función de fuerza modal “sj”.

El efecto de la acción sísmica en este caso, indica que los esfuerzos axiales de los nervios son menores que aquellos originados por “sjx”, hecho que se evidencia en la región próxima a los nodos donde se conectan con los elementos lineales que representan las vigas canal (2,38 MPa) y vigas en “L” (6,60 MPa) (Fig.3.89).

En el caso de los pilares de los pórticos subsiguientes a los pórticos de los extremos y pilares rotados, ahora los esfuerzos a compresión ocupan una superficie mayor del elemento (-5,35 MPa). Al igual que en esfuerzo “sz” anterior, los mayores esfuerzos a compresión y tracción (-25,05 MPa y 17,15 MPa) se ubican en los extremos de nervios y vigas transversales (Fig.3.89).

d) Desplazamientos: deriva

Para el cálculo de la deriva se considera como referencia el plano de cada uno de los pórticos de los extremos de cada bloque.

En el pórtico “A1-C1”, el mayor desplazamiento es de -0,0026 metros—producto del sismo en “X”—, y ocurre en el nodo 13013, ubicado en el punto medio del

pórtico; mientras la deriva de este plano es de 0,00068 (Fig.3.90).

En el pórtico “A6-C6”, el mayor desplazamiento es de -0,001 metros—producto del sismo en “Y”—, y ocurre en el nodo 464, ubicado en punta del extremo del pilar “C5”; mientras la deriva de este plano es de 0,00029 (Fig.3.90).

En el pórtico “A7-C7”, el mayor desplazamiento es de -0,0027 metros—producto del sismo en “X”—, y ocurre en el nodo 560, ubicado en punta del extremo del pilar “C5”; mientras la deriva de este plano es de 0,00071 (Fig.3.90).

En el pórtico “A12-C12”, el mayor desplazamiento es de 0,0011 metros—producto del sismo en “X”—, y ocurre en el nodo 80, ubicado en punta del extremo del pilar “C1”; mientras la deriva de este plano es de 0,00029 (Fig.3.90).

e) Participación de la masa

En el caso de esta obra para la lectura de la masa transportada, es importante considerar la junta constructiva.

En la dirección “X”, es el sexto modo el que mayor cantidad de masa moviliza (88,16%) en la parte derecha, mientras que la parte restante es transportada en un 72,73% por el décimo segundo modo.

En la dirección “Y”, es el décimo quinto modo el que mayor cantidad de masa moviliza (43,96%) en la parte derecha, mientras que la parte restante es transportada en un 34,30% por el décimo noveno modo.

3.4.1.5 Síntesis de la forma

La decantación del arquitecto por el uso del pórtico como unidad estructural en el proyecto, obedece al establecimiento de un espacio diáfano para su máximo aprovechamiento en relación al programa, así como la búsqueda del ideal de vinculación con la ciudad. El gimnasio plantea una sucesión de pórticos bajo una única cubierta, para lo cual resulta necesaria la alineación transversal de vigas que los arriostren, y así transmitir la carga hacia las fundaciones.

La mayoría de pórticos empleados poseen un soporte central para estructurar un pórtico de dos vanos, que lo rigidiza, sin embargo, hacia los extremos—ingreso a la edificación—un pilar rotado retrasado sustituye a los pilares centrales que les correspondería a los dos últimos pórticos. Esta sustitución y rotación, altera el comportamiento general de la estructura, que fue comprobado en los modos de vibrar. Cuando la estructura se desplaza en dirección “X”, estas condiciones implican una alteración en el transporte de la masa de la cubierta, que vuelve vulnerable al pórtico de acceso que no cuenta con un soporte central, y obliga al pilar rotado a transportar la masa que debían transportar dos pilares. En este sentido la adopción de una junta constructiva—establecida en la norma—que permita trabajar a la estructura en dos bloques resulta beneficioso. Se observa además que, en el caso de un movimiento en “Y”, es vulnerable al pandeo, a pesar de que el armado de la losa comprende que los extremos de este elemento sean amarrados con vigas.

De este modo, es evidente que primó el criterio arquitectónico por sobre el estructural que implicó la incorporación de una viga que amarra los pilares

centrales dando origen así, a un nuevo módulo estructural junto a la viga del pórtico de acceso y la viga del pórtico subsiguiente.

Otra decisión de carácter arquitectónico relacionada con el recorte practicado en la losa del bloque izquierdo, implicó el uso de un nuevo módulo estructural en el armado de la estructura de cubierta—viga del pórtico “A5-B5”—ante la falta de confinamiento.

La manipulación de la forma en este caso complejiza el comportamiento de la estructura básicamente por la inclusión del pilar rotado, sin embargo, a partir de esta decisión el autor plasma su idea de arquitectura de carácter urbano, por lo que, visto desde esa perspectiva, es lógico el uso de un pórtico de un solo vano en los accesos. Esta decisión junto con el recorte de la losa, son por sobre todo arquitectónicas, que, si bien originan el uso de más módulos estructurales, responden a una problemática arquitectónica.

El análisis estructural permitió determinar que los desplazamientos en caso de carga sísmica no representan un riesgo en el cálculo de la deriva, y en relación a los esfuerzos normales analizados, se observa como únicamente en los esfuerzos en “Z”, aparecen esfuerzos puntuales—en los extremos de los nervios—que superan la resistencia del hormigón de 20,6 MPa y que, en la edificación podría implicar la aparición de fisuras en la estructura. Sin embargo, resulta interesante una lectura particular de los esfuerzos presentes en elementos estructurales característicos de la obra.

Con respecto a los pilares periféricos, la distribución de esfuerzos no es uniforme, y a medida que se aproximan

hacia el exterior de esta “aleta” los esfuerzos tienden a ser mínimos, lo que sugiere que pudo haberse pensado en alguna forma que concentre las cargas en una superficie menor, contribuyendo a la rigidez del elemento. Sin embargo, es esta extensión de la superficie del pilar, la que permite a estos elementos actuar como quiebrasol para solucionar el problema del soleamiento. Además, su superficie permite que se incorpore una viga canal destinada para la recolección de aguas lluvias, que a la vez que rigidiza los pilares.

Se observa además que, el pilar “A6” y la viga que lo amarra, apenas registran esfuerzos. A partir de esta información se infiere que, la existencia del pórtico “A6-B6”, obedece más a un criterio arquitectónico, que a una contribución al funcionamiento general de la estructura—debido a que no se conecta al pórtico próximo mediante las vigas de amarre transversales para poder generar el recorte en la losa que soluciona problemas de ventilación e iluminación. Además, la ausencia de este pórtico hubiese alterado el orden visual de la obra en relación a sus ejes de simetría (longitudinal y transversal), que permiten su disposición en peristilo.

De este modo, el desarrollo de la forma estructural expuesto, pudo haber sido la siguiente:

“Diálogo”: El arquitecto tenía conocimiento respecto al funcionamiento de una estructura aporticada—que le sirvió para definir la forma de los pilares periféricos a partir del diagrama de momento flector de un pórtico, y que le permitiría solucionar problemas como el soleamiento y recolección de aguas lluvias. Sin embargo, si bien la magnitud de los esfuerzos no sobrepasa la capacidad de resistencia del hormigón,

en el parte baja de estos elementos, la concentración de esfuerzos no representa ningún beneficio a nivel estructural, sino más bien todo lo contrario, por lo que se intuye que mediante un cálculo estructural este riesgo fue desestimado.

La decisión de prescindir de pilares intermedios en los accesos, podría haber sido motivo del acercamiento al ingeniero estructural, a partir del cual, surge la figura del pilar rotado de aún mayores dimensiones—para evitar que los esfuerzos fuesen mayores en esta parte de la cubierta—, que se inserta en el espacio arquitectónico.

“Soliloquio”: Este escenario supondría la concepción de la forma estructural a partir del funcionamiento general—incluido el pilar rotado. La exageración de las formas—característica de esta aproximación a la forma estructural—, es evidente a partir de los esfuerzos máximos que alcanzan elementos escultóricos como los pilares cuyos esfuerzos máximos representan apenas el 56% de la capacidad de resistencia del hormigón.

3.4.2 Casa en Butantã

3.4.2.1 Análisis histórico

Previo a la construcción de la Casa en Butantã, se considera un período de evolución de la arquitectura residencial paulista comprendido entre 1920 y 1960. Para ello cabe destacar textos del arquitecto brasileño Nestor Goulart Reis Filho—publicados en la revista de arquitectura *Acrópole* en sus ediciones de septiembre y octubre de 1968—, que han sido analizados para comprender la arquitectura residencial paulista.

Período 1920-1940

A inicios de la década de 1920, surgen en Brasil la “ciudad-jardín”—destinados a las clases más favorecidas—, y precisamente fue São Paulo una ciudad donde este modelo estuvo en boga. Este modelo urbanístico—influenciado por intelectuales extranjeros—se basaba en la posibilidad de hacer compatible las antiguas chacras como residencias urbanas. Los lotes tradicionales conservaron los jardines y retiros obligatorios, aunque desaparecerían las áreas de uso común presentes en el esquema inglés. La mayor transformación de las residencias fue respecto a los retiros, lo que se consideró como una “liberación de los límites”.

El esquema de “ciudad-jardín”, estaría vigente hasta 1968 en proyectos de arquitectos influenciados por antiguas tendencias de discriminación social—influenciadas por los hábitos coloniales y por el régimen de esclavitud. Estas tendencias originaron también duplicidades funcionales (Fig.3.91) innecesarias en los programas de vivienda, como las *salas de almoço*

(salas de almuerzo) y *salas de jantar* (comedor). La jerarquización de espacios dependía del frente de la casa. Aquellas habitaciones que estaban más próximas a este lado tenían “mayor valor”, tanto en planta alta como baja, mientras que los fondos y, a veces, el lateral más estrecho, como áreas de servicio, eran sitios de completo “desprestigio social” (Fig.3.91).

En esa época, la arquitectura más avanzada se veía condicionada por estos esquemas de organización espacial, y la técnica constructiva de paredes estructurales de ladrillo era la que más se adaptaba debido a su rigidez. En São Paulo, arquitectos como el franco-brasileño Victor Dubugras, encontraron en el empleo del hormigón, una forma más flexible de abordar el problema, sugiriendo así, el “camino” por el que la arquitectura residencial unifamiliar debía transitar. Hasta 1937, los esfuerzos del movimiento modernista para liberarse de estas limitaciones tuvieron pocos resultados. Un tratamiento arquitectónico cubista en las cuatro elevaciones, ocultaba muchas veces las paredes de ladrillo y una disposición general tradicional (Fig.3.92).

En términos generales, las residencias individuales de este período no presentaban alteraciones tecnológicas significantes. Apenas, se substituyeron progresivamente por productos nacionales los equipos y materiales inicialmente importados. Las soluciones técnicas eran más o menos semejantes. Las paredes de ladrillo obligaban la repetición de las plantas en el segundo nivel. Las características de los métodos constructivos favorecerían el apareamiento de casas de *tijolinhos* (Fig.3.93), es decir, casas de ladrillo visto, que tuvieron en Dubugras a su máximo exponente.

Período 1940-1960

Goulart Reis Filho identifica un segundo período en la arquitectura residencial que se inicia alrededor de 1940, con la Segunda Guerra Mundial, y culmina en 1960. Fue un período de intensa industrialización y urbanización dentro de la historia de Brasil, avances técnicos y económicos, y profundas transformaciones sociales. Las restricciones a las importaciones en el país en el período de guerra, fueron un estímulo para que la industria de ese país substituya los materiales importados por productos nacionales, cambios que se reflejarían en la arquitectura.

Las viviendas unifamiliares aisladas se beneficiaron de las innovaciones arquitectónicas, resultado del avance técnico y económico. El uso del concreto liberó a las paredes de función estructural alguna, y a la estructura de la rigidez de su disposición, mientras las losas de piso y cubierta sustituyeron a las estructuras de madera. También las vigas y columnas se construyeron en concreto, en lugar de paredes estructurales de ladrillo, material que pasaría a ser utilizadas como elemento de cierre.

Casa en Butantã

Hacia finales de la década de 1960, la vida familiar fue clave en la generación del espacio de la vivienda, que reflejaba los cambios de la época. Así, un nuevo enfoque arquitectónico apareció, en el que salas, dormitorios, baños, vestuarios, pasillos y escaleras, serían despojados del desprestigio del colonialismo, buscando su integración al programa arquitectónico (Nobre, 2007).

Planta esquemática do tipo de habitação mais comum

Pavimento térreo: 1 - Terraço; 2 - Escritório ou Sala de visitas; 3 - Sala de estar; 4 - Sala de jantar; 5 - Jardim de inverno; 6 - Cozinha; 7 - Copa; 8 - Lavabo; 9 - Coberto para automóvel, Edícula; 10 - Galinheiro; 11 - Dormitório de criadas; 12 - Banho; 13 - Tanque; 14 - Garagem. Andor superior: 15 - Dormitório; 16 - Banheiro.



Residência em São Paulo. O apuro do projeto e a amplitude do jardim lateral não conseguem disfarçar o paralelismo do edifício em relação aos limites do lote e a hierarquia social dos espaços



Figura 3.91. Modelo vivienda influenciada por la esclavitud

Fuente: Acrópole (1968), pp. 38. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/354>

Acropole septiemb

Residência em "estilo moderno" dos anos '30, com platibanda escondendo o telhado de tipo tradicional e influências formais cubistas ou néo-plásticas



Figura 3.92. Tratamiento arquitectónico cubista de una vivienda

Fuente: Acrópole (1968), pp. 38. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/354>



Figura 3.93. Casa de tijolinhos

Fuente: Acrópole (1968), pp. 38. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/354>



Figura 3.94. Vista general de las Casas Gemelas

Fuente: Anónimo (s.f.) Recuperado de: Cortesía Archivo oficina PMR

Alineado a este enfoque de la vivienda se encontraba Paulo Mendes da Rocha con su ideal de arquitectura comunitaria—oponiéndose a un sistema social que privilegia los intereses individuales—, mismo que se hace evidente en las residencias unifamiliares que proyecta, como las Casas Gemelas (Fig.3.94). Para la arquitecta brasileña Ana Luiza Nobre (2007), la decisión de proyectar estas casas es “una provocación al modelo urbanístico de ciudad-jardín”, en la que la vivienda aislada es símbolo de estatus, y considera que, en el caso de esta obra, el proyecto se “beneficia de la ausencia de presiones del mercado comercial”, en un momento que se buscaban soluciones que permitiesen la construcción seriada de arquitectura de calidad.

Se trata de dos casas cuyas semejanzas se expresan en la implantación, diseño general de fachadas y solución estructural, separadas únicamente por un paseo. Debido a la similitud entre ambas, es la Casa en Butantã—como se le conoce a la antigua residencia del arquitecto y actual hogar de uno de sus hijos—, la que ha sido objeto de mayoría de análisis y estudios.

El anteproyecto lo desarrollaron los arquitectos Paulo Mendes da Rocha y João Eduardo de Gennaro, mientras que el proyecto arquitectónico estuvo a cargo únicamente de Mendes da Rocha. El cálculo estructural y cimentaciones estuvieron a cargo de Conscal Consultas y Cálculos Ltda teniendo al Ing. Siguer Mitsutani como ingeniero responsable—además docente en la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo—, mientras el ingeniero a cargo de la ejecución de la obra, entre 1964 y 1967, fue Osmar Augusto Souza e Silva, de la empresa Cenpla-Construções, Ingeniería y Planeamiento Ltda.

Las residencias se ubican a orillas del río Pinheiros, en el barrio residencial de Butantã, que se caracterizaba por sus grandes lotes entre plazas y áreas verdes. El lote esquinero donde se encuentra la vivienda del arquitecto tiene un área de 715 m², y da frente a la Plaza Monteiro Lobato (Fig.3.95). Para integrar la vivienda a esta plaza, el arquitecto decide no alinearse a los retiros, dando así, continuidad al paseo público, mediante la creación de un talud (Silva & Ferreira, 2017). Así, a través de la manipulación de la topografía la vivienda se presenta como una edificación de una planta, que arranca 50 centímetros sobre el nivel de la vía (Fig.3.94).

El programa surge a partir de la necesidad de construir una casa para él y para la pareja Luiz Gonzaga y su hermana Lina Cruz Secco. Según la arquitecta brasileña Denise Chini Solot (1999), el hecho que las casas sean idénticas “se opone a la individualidad burguesa típica de las áreas residenciales nobles paulistas”, además sostiene que el arquitecto “pone en cuestión el concepto de privacidad dentro del propio núcleo de una residencia particular”. Según Silva & Ferreira (2017), la concepción de la residencia como “ensayo de prefabricación” supone una crítica a la representación burguesa, ejemplificado en la modulación de elementos como marcos de ventanas, así como de los elementos en el sistema constructivo. Hideki Abe (2009) considera a la reformulación de la residencia burguesa, la investigación en la organización del espacio, la “industrialización del lugar de construcción” y el uso de concreto como principales características que definen esta obra.

De acuerdo al arquitecto brasileño Tiago Oakley (2006), la esbeltez de las piezas con las que se proyectaron las

residencias, prevé “una estructura libre para trabajar y moverse” debido a las deformaciones por el cambio de temperatura y aquellas relativas al material utilizado.

En marzo del 2018 es reconocido el valor histórico de las residencias por parte del Consejo Municipal de Preservación de Patrimonio Histórico, Cultural y Ambiental de la Ciudad de São Paulo (Conpresp). Finalmente, el día martes 26 de febrero del 2019, la *Prefeitura de São Paulo* (Ayuntamiento de San Pablo), declaró patrimoniales a seis obras de Mendes da Rocha, entre las que se encuentra las Casa Gemelas, obteniendo el reconocimiento de *tombamento*. Esta declaratoria considera “la importancia del conjunto en la contribución de la arquitectura paulista y paulistana en la historia de la Arquitectura Moderna Brasileña que se intensifica a partir de mediados de los años 50” (Mengue, 2019).

3.4.2.2 Análisis arquitectónico

Mendes da Rocha replantea el esquema tripartito de organización espacial (zona social, descanso y servicio) característico de la arquitectura residencial paulista de inicios de siglo, y al seguir su idea de dimensión pública que maneja en cada proyecto, lo plasma en el programa.

El arquitecto, utilizando la técnica constructiva del hormigón armado, configura una caja elevada por pilotis—destacada por sus volados y finas losas—que contiene las tres zonas, que, aunque todavía perceptible la distinción entre espacio de la criada y familiar, ambas se encuentran incluidas en el mismo volumen, hecho que hubiese sido impensado anteriormente con el sistema murario, sumado esto a las marcadas

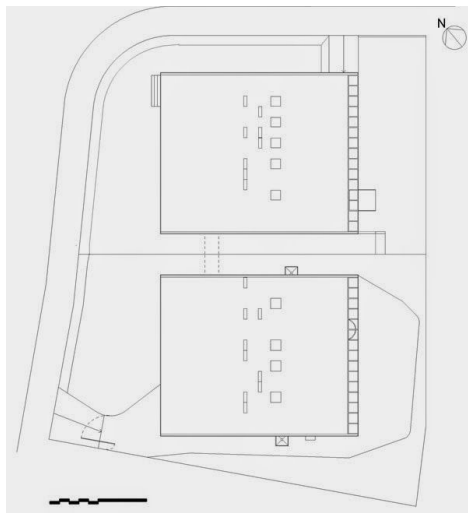


Figura 3.95. Planta de cubiertas de las Casas Gemelas

Fuente: Plataforma Arquitectura (2014). Recuperado de: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-341082/clasicos-da-arquitectura-casa-en-butanta-paulo-mendes-da-rocha-y-joao-de-gennaro?ad_medium=gallery



Figura 3.96. Vista general del acceso donde se ubica el jardín cubierto y escalera exterior de la Casa en Butantã

Fuente: Anónimo (s.f.). Cortesía de: Archivo oficina PMR

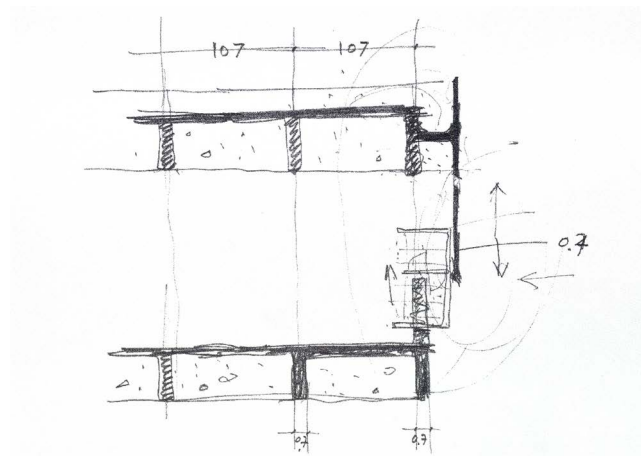


Figura 3.97. Boceto del corte de losa de entrepiso y losa de cubierta de la Casa en Butantã

Fuente: Paulo Mendes da Rocha (s.f.). Cortesía de: Archivo oficina PMR



Figura 3.98. Vista del tragaluz horizontal situado en el área social de la Casa en Butantã

Fuente: Annette Spiro (s.f.). Cortesía de: Archivo oficina PMR

diferencias sociales de la época.

La Casa en Butantã es un volumen simétrico, con dos lados paralelos acristalados, y protegidos por aleros. Éstos últimos surgen a partir de la prolongación de vigas en volado hacia ambos lados formando un apergolado, que tiene como función proteger las ventanas y proyectar sombra hacia el interior (Fig.3.96).

Los lados restantes, mientras tanto están conformados por paños de hormigón que cuelgan de la losa de cubierta y que además conforman canales de recolección de agua (Fig.3.97). En estos elementos se han practicado perforaciones para dar lugar a “tragaluces horizontales” (Fig.3.98), a partir de los cuales surgen mesones hacia el interior de la vivienda, aunque estructuralmente no forman parte de los mismos (Fig.3.98 y Fig.3.100).

El programa de la Casa en Butantã se distribuye en dos niveles que se originan a partir de su estructura principal—similar al sistema Dom-ino de Le Corbusier—compuesta por cuatro soportes, liberando de esta manera a las paredes divisorias de su función estructural. En relación a las obras del movimiento moderno de aquel país, Mendes da Rocha da un paso hacia adelante, al mostrar la realidad constructiva y estructural mediante un tratamiento cubista.

En planta baja, la estructura permite liberar un área de 250 m². En esta cota, el programa contempla un área de servicio que incluye: un cuarto para empleados, un sanitario, un gabinete y un cuarto de máquinas (Fig.3.99). Todos estos espacios se inscriben en una circunferencia de 6,3 metros de diámetro, definida por ejes que coinciden con las vigas que forman parte de la losa de entrepiso. Esta figura está comprendida entre

los pilares “A1” y “A2” (Fig.3.99), cuyo eje longitudinal recorre el arranque de la escalera exterior.

El único espacio previsto por fuera de la circunferencia correspondía a un jardín, ubicado también bajo la losa de entrepiso (Fig.3.99), aunque ese espacio es usado aparentemente como estacionamiento en la actualidad. Aquí, las sombras que las losas proyectan, ocultan los soportes, y de este modo, según el arquitecto brasileño Rafael Cunha Perrone (2014), se “niega a la estructura, haciéndola flotar, negando la gravedad”.

Al piso superior se accede por la escalera exterior—cuyo descanso (2,08 m x 3,37 m) a 1,06 metros de altura se apoya sobre una columna de sección cuadrangular de 50 centímetros—que se encuentra parcialmente cubierta por la proyección de la losa de cubierta. Así, se configura la estructura de la grada, que se establece como independiente a la de la obra arquitectónica.

El ancho de la escalera también marca la circulación principal, que conduce al usuario hacia los distintos espacios, si bien en realidad, estos espacios tienden a fundirse con la circulación—optimizando el espacio—, acorde a la idea del arquitecto de disolver lo público de lo privado, favoreciendo de este modo a la socialización.

En planta alta, las paredes divisorias de 4 centímetros no actúan como claras separaciones al no llegar al techo, y han sido fijadas con varillas metálicas para asegurar independencia de la estructura de cubierta, y así permitir su libre movimiento (Otondo, 2016). Esta decisión respecto a las paredes, según el arquitecto, favorecería a una mayor propagación del sonido y consecuentemente una mayor interacción de la familia, además de favorecer a la ventilación de las

habitaciones que carecen de ventanas (Costa, 2015). Al no ser estructurales las paredes—a diferencia de otros sistemas que consideran el esquema simétrico—, en la Casa en Butantã, su manejo no tuvo restricciones al momento de ordenar el espacio, aunque casi en su totalidad, las paredes divisorias que se desarrollan longitudinalmente coinciden con las vigas. Lo que sí es evidente en relación a la estructura, es que su disposición condiciona la ubicación de la zona de descanso hacia el área comprendida entre los soportes, en búsqueda de intimidad (Fig.3.100). La estructura toma también protagonismo—en el caso de los nervios—al formar parte de los ductos de cocina y de la chimenea en el área social (Fig.3.101).

Al interior del espacio rectangular delimitado por los soportes, se organizan los dormitorios (Fig.3.100)—con sus respectivas zonas húmedas—, que se encuentran iluminados mediante claraboyas (Fig.3.102). Los espacios comunales—ubicados en la periferia—cuentan con iluminación y ventilación directa. La ventilación también se resuelve según Verde Zein (2005) en sentido transversal a través de la concepción de los paños de hormigón que descienden desde la losa y se desapegan del antepecho de 80 centímetros, creando así una abertura que permite la entrada de aire (Fig.3.97).

La decisión de expresar los materiales en crudo se refleja no únicamente en el tratamiento del propio material, sino también en todo el sistema eléctrico e hidráulico, para facilitar su manutenzione. Estos elementos, que por lo general son ocultos, en la residencia son considerados desde la concepción del proyecto. Esta exposición de los elementos está relacionada también, según el arquitecto brasileño Tiago Oakley (2006), al

libre movimiento a la que se ve obligada la estructura.

3.4.2.3 Análisis sistema estructural

La estructura de la Casa en Butantã fue concebida como “una estructura fundamental, de hormigón armado in situ, pero con una retícula (...) modulada rigurosamente, coherente con una visión de prefabricación” (Otondo, 2006). El material según Nobre (2007), permite que la casa sea fundida como “un todo monolítico, cohesivo e inalterable”, que no da lugar a la “expansión, adaptación, adición o sustracción de cualquiera de sus partes”.

La estructura de la residencia según Mendes da Rocha, “parte de una visión estructural isostática, para la realización de una estructura hiperestática”. Para ello, según el arquitecto, son necesarias piezas de alturas mínimas para el correcto funcionamiento de este tipo de estructuras (Otondo, 2016).

La estructura concuerda con la sencillez del diseño arquitectónico, que considera a columnas, vigas y losas como elementos del sistema estructural. En este proyecto—en el que la concepción estructural es una de las fuentes de generación de forma del proyecto—se emplean pequeñas columnas, únicamente dos vigas maestras transversales, nervios y losas nervadas, que soportan esta “caja” de concreto (Athanasopoulos & Kenchian, 2017). Cortes longitudinales y transversales revelan los diferentes elementos estructurales utilizados en la obra (Fig.3.103 y Fig.3.104), que componen los 10 módulos estructurales empleados—constituidos por elementos horizontales y verticales.

De acuerdo a la dimensión de cada losa, es posible

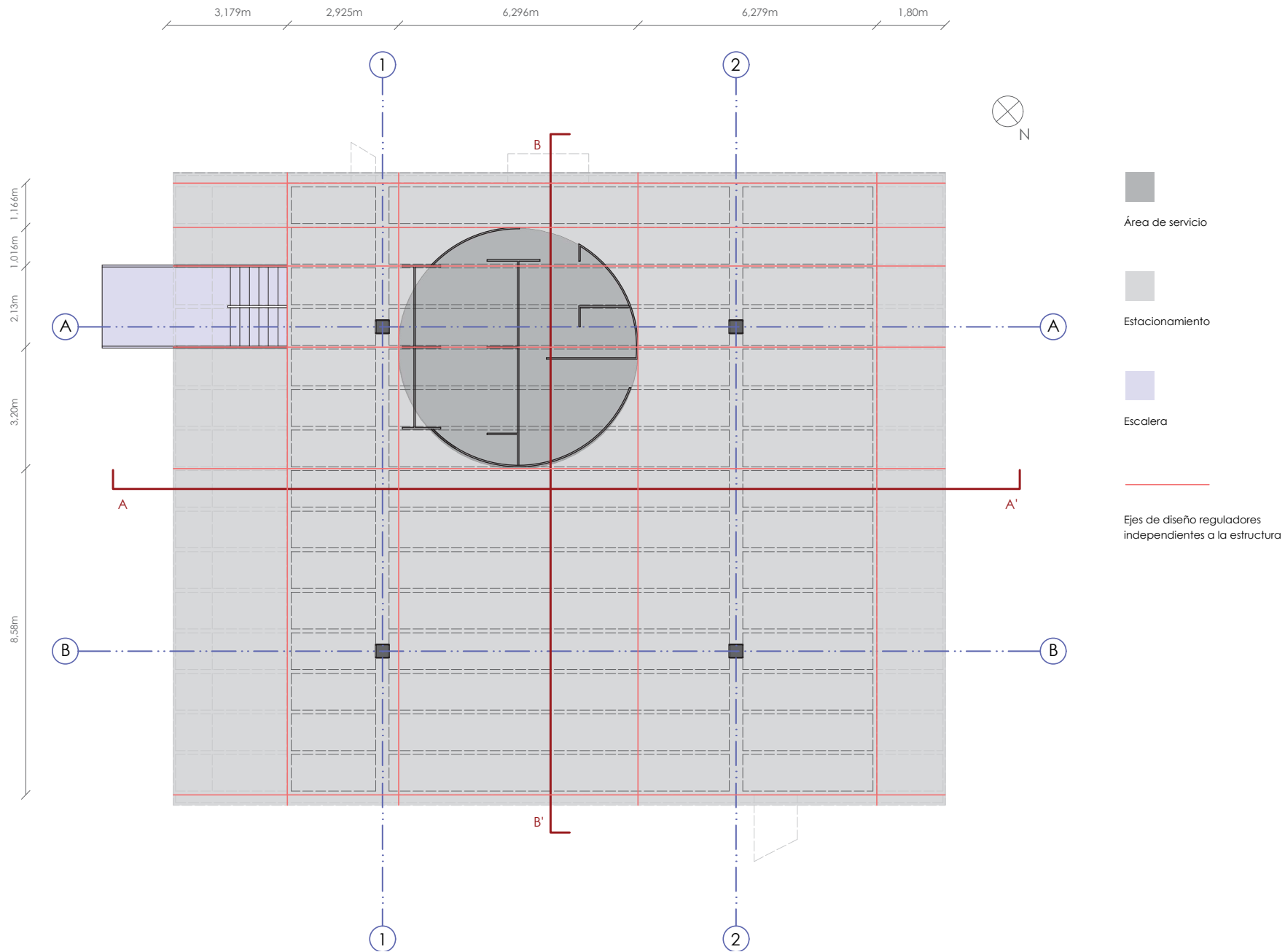


Figura 3.99. Zonificación planta baja arquitectonica de la Casa en Butantã. Esc.1:150

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR

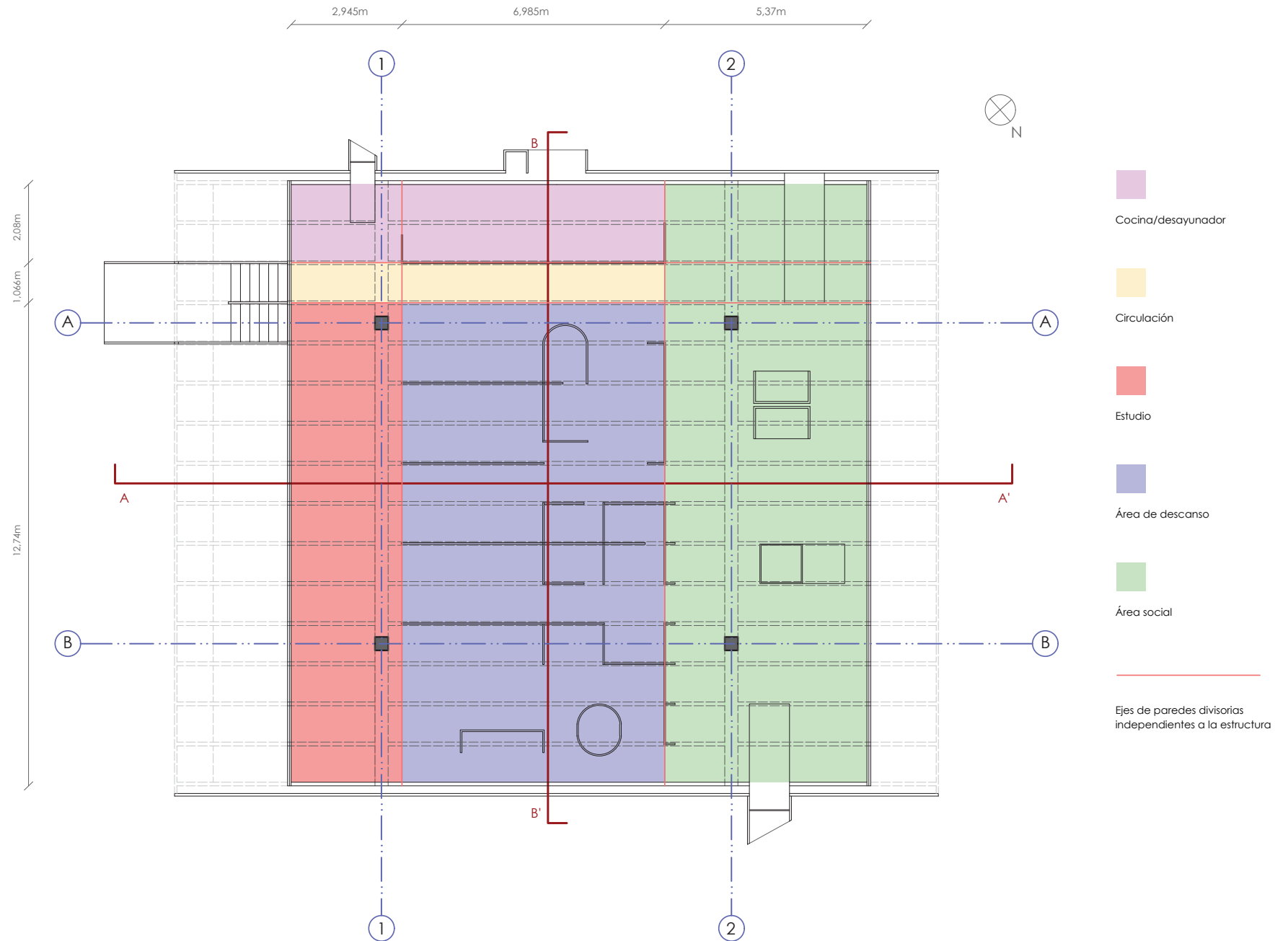


Figura 3.100. Zonificación planta alta arquitectónica de la Casa en Butantã . Esc.1:150

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR



una lectura de los soportes en función de su ubicación respecto a estos elementos. Mientras que en la losa de entrepiso (15,5 x 16,09 metros) las columnas se disponen asimétricamente respecto al eje transversal, en la losa de cubierta (20,3 x 16,63 metros), son simétricos respecto a la cubierta (Fig.3.105 y Fig.3.106). Son cuatro las columnas que constituyen el principal módulo estructural empleado en la obra, ya que se encargan de transmitir el peso de la vivienda hacia las fundaciones.

La distancia entre las columnas en sentido longitudinal puede tomarse como una dimensión de referencia para entender la longitud de los nervios que se extienden perpendicularmente. Exactamente la misma lógica, que parte de la distancia de las columnas como canon de medida, se observa también en el desarrollo de las vigas maestras (Fig.3.103 y Fig.3.104).

A partir de las columnas surgen dos vigas transversales que estructuran la losa nervada unidireccional—en sentido longitudinal—y que componen diferentes módulos estructurales (Fig.3.105 y Fig.3.106). La separación entre cada nervio ha sido prácticamente la misma de aquella establecida al momento de la concepción de la obra (1,07 metros), y que ha sido fijada en 1,066 metros entre cada eje, de manera que son 16 los nervios—perpendiculares a las vigas maestras—los que configuran la losa en cada nivel. Mendes da Rocha comenta cómo el cálculo de la losa—que recuerda a los paneles "doble T" prefabricados—llevado a cabo por Mitsutani "llegó a un grosor que no respetaba la norma" (Piñón, 2003). Según Fulvio Roxo (2019) las dimensiones mínimas que se manejaron fueron posibles debido a la normativa vigente de la época que estipulaba un recubrimiento mínimo de 1,5 centímetros.

Adicionalmente entre los nervios del forjado, pequeños nervios en el sentido opuesto han sido empleados para generar aberturas en la losa de cubierta para permitir el ingreso de luz.

Los nervios (10 centímetros de espesor) se extienden por 20,3 metros en la losa de cubierta (Fig.3.106), mientras que los nervios de la losa de entrepiso (8 centímetros de espesor) por 15,5 metros en la de entrepiso (Fig.3.105). Su peralte coincide con el de las vigas maestras en cada planta, a excepción de los extremos de cada lado (módulos estructurales) donde se remata con una viga-canal. Aquí el nervio se prolonga—hasta medir 2,37 metros—actuando como muro de cierre hacia el exterior (Fig.3.103), y se caracteriza, además, por las perforaciones de los tragaluces (Fig.3.103).

Así el conjunto superior—formado por la losa de cubierta y muros de hormigón—al despegarse del conjunto inferior—formado por la losa de entrepiso y antepechos que actúan como vigas perimetrales—adquiere independencia estructural respecto a la losa de entrepiso (Fig.3.103), y se vincula apenas por las columnas.

Las cuatro columnas poseen una sección cuadrangular de 35 centímetros y 5,45 metros de altura. La altura total se reparte de la siguiente manera: en la planta baja la altura de la columna es de 2,50 metros, que considera la altura libre de 2 metros, sumado al peralte de las vigas maestras y al espesor de 5 centímetros de la losa. Las columnas continúan con su desarrollo de 2,88 metros correspondientes a la distancia libre entre el piso (2,4 metros), más el peralte de las vigas maestras y la losa de cubierta de 7 centímetros de

espesor (Fig.3.103 y Fig.3.104). El reducido número de columnas—ancladas al suelo por pilotes—según Mendes da Rocha considera la llanura de inundación del terreno, debido a la proximidad al río Pinheiros (Fig.3.107), es así, que a partir de esta condición surge el interés del arquitecto en "concentrar cargas dentro de ciertos límites" (Piñón, 2003).

La tipología empleada en la Casa en Butantã, de acuerdo a la clasificación de Engel (2001), corresponde a una "estructura de losa nervada", que tiene al pórtico con vigas en voladizo como su unidad estructural. Al haber sido fundida en sitio, constituye una pieza única de concreto que expresa continuidad constructiva y estructural. En relación a esta última condición, es evidente la transmisión de cargas de manera puntual mediante las columnas. En esta obra se percibe un camino a medio recorrer entre: la aspiración tectónica del arquitecto con su visión de prefabricación—en la que hubiese aparecido nudos o juntas—, y la ejecución monolítica la define como estereotómica.



Figura 3.101. Vista general del ducto de chimenea y de mesón de hormigón
Fuente: Anónimo (s.f.) Cortesía de: Archivo oficina PMR

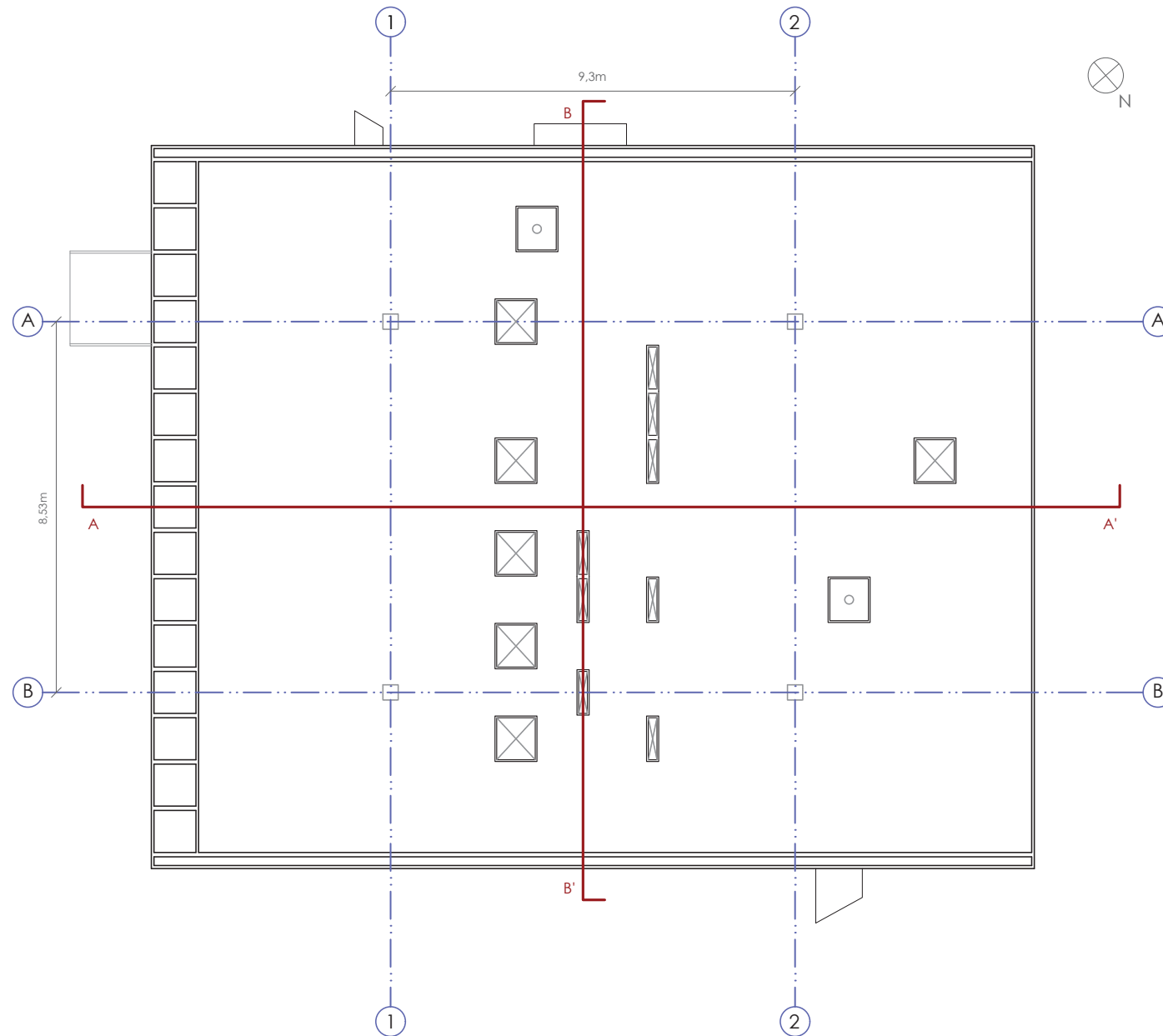


Figura 3.102. Planta de cubiertas de la Casa en Butantã. Esc.1:150

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR

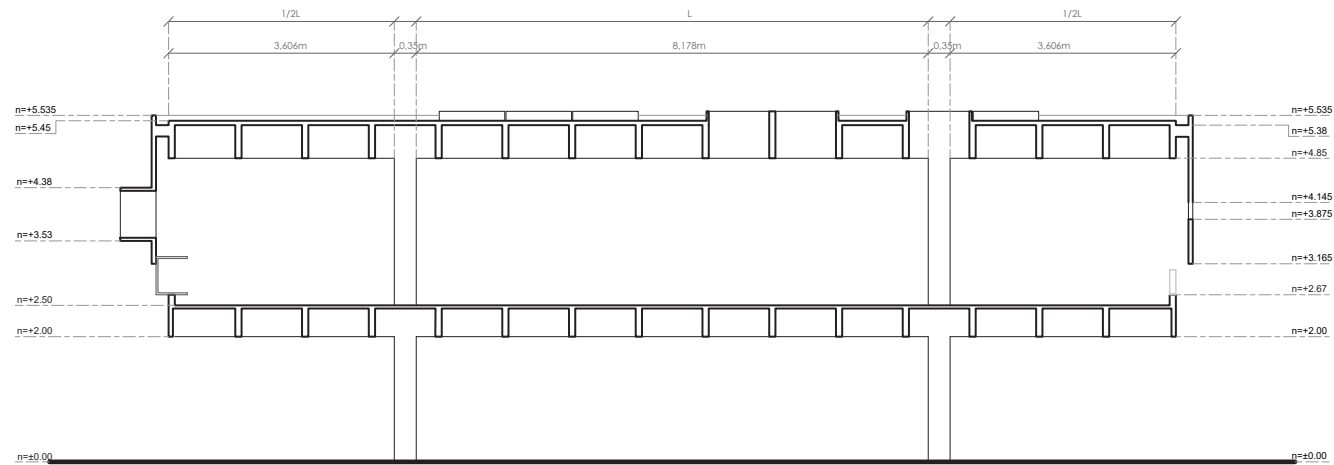


Figura 3.103. Sección transversal B-B' de la Casa en Butantã. Esc.1:125

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR

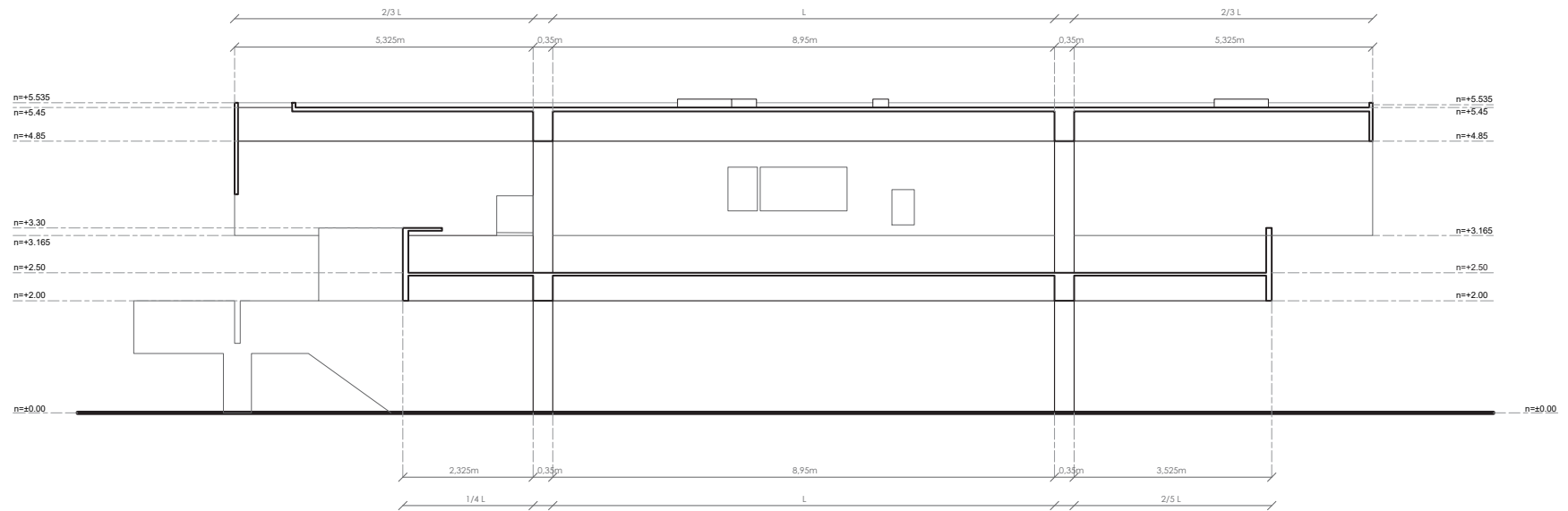


Figura 3.104. Sección longitudinal A-A' de la Casa en Butantã. Esc.1:125

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR

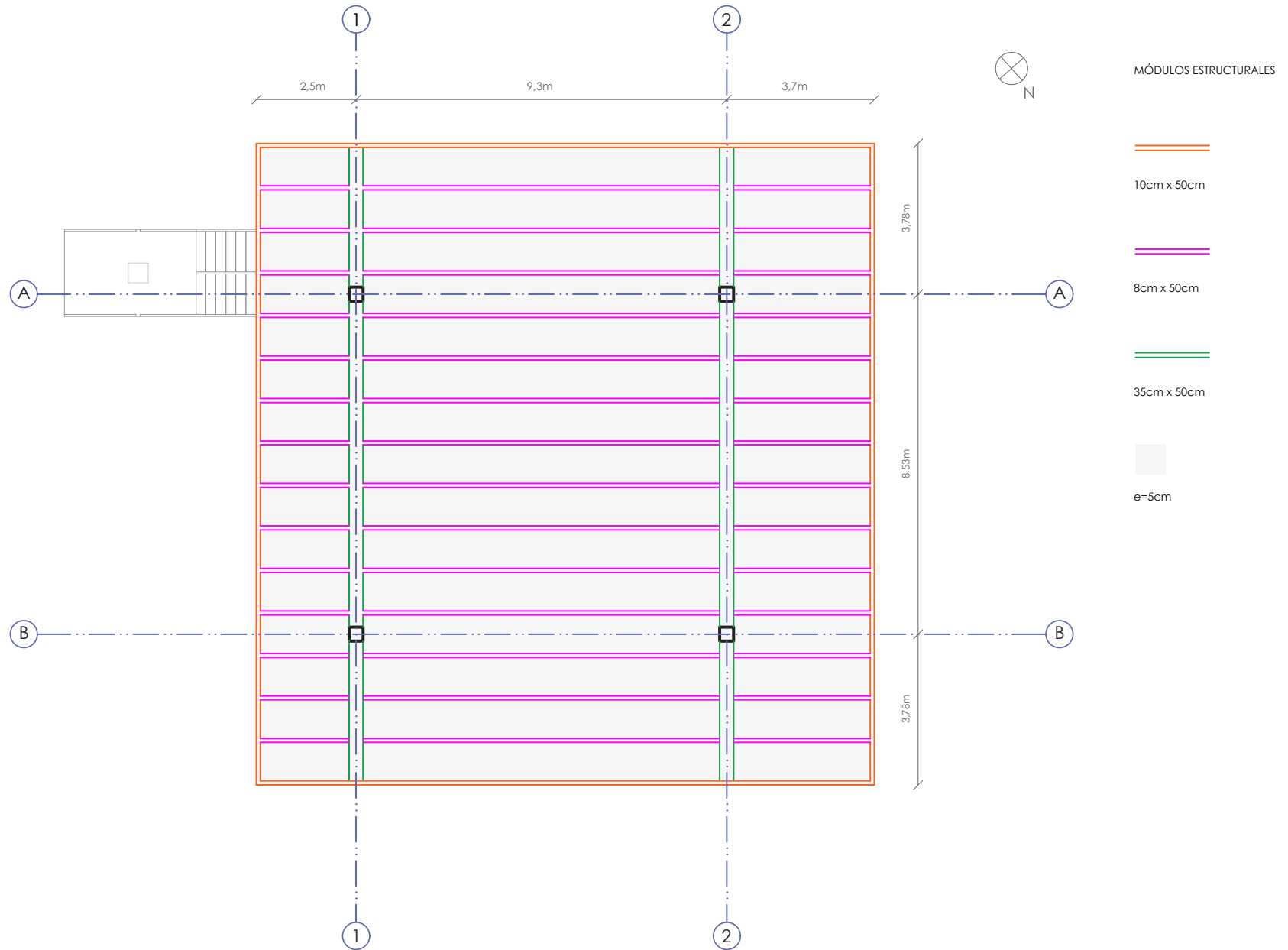


Figura 3.105. Planta estructural de la losa de entrepiso de la Casa en Butantã. Esc.1:150

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR

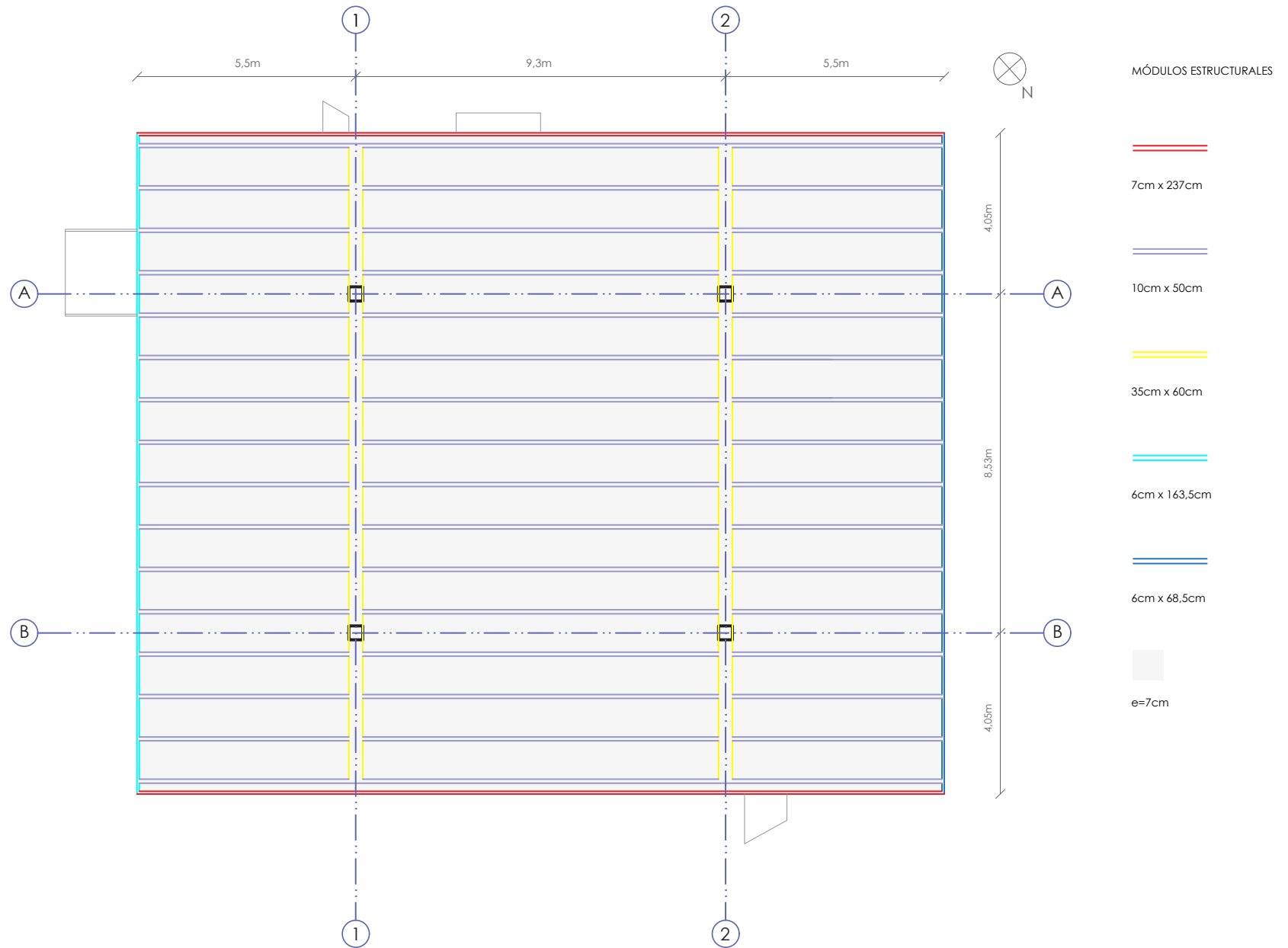


Figura 3.106. Planta estructural de la losa de cubierta de la Casa en Butantă. Esc.1:150

Elaboración: Dibujo del autor a partir del Archivo oficina PMR

3.4.2.4 Análisis estructural

3.4.2.4.1 Construcción del modelo

El modelo construido de la Casa en Butantã, se aproxima al igual que el modelo anterior, mediante el uso de elementos bidimensionales, a excepción de las columnas. Vale aclarar, que, en el análisis del sistema estructural se constató que la estructura de la grada exterior es independiente de la vivienda, por lo tanto, no se consideró en el modelo. En la losa de cubierta se consideraron las dos principales perforaciones que además aportan peso al conformar ductos (cocina y chimenea). Adicionalmente, como fue explicado en el análisis anterior, las paredes no forman parte del monolito que constituye la estructura, siendo esta la explicación a su exclusión del modelo. Se constató también que, la estructura de los mesones no surge a partir de los tragaluces horizontales, motivo por el cual no se incluyó en el modelo, pero su peso forma parte de la carga distribuida al igual que el de los muebles de concreto.

Para la ubicación de las columnas se determinó el centroide de su sección (35 x 35 centímetros). Cada columna está compuesta de varios tramos correspondientes a las secciones de otros elementos estructurales—que componen las losas—que atraviesa la columna hasta alcanzar su altura total de 5,415 metros de altura. El primer tramo corresponde a la distancia entre piso y el arranque de la viga maestra de la primera planta (2 metros), el segundo al peralte de estas vigas hasta el eje de la losa de entrepiso (0,475 metros), el tercer tramo a la distancia entre el eje de la losa de entre piso y el arranque de la viga maestra de la segunda planta (2,375 metros), y el cuarto y último

tramo corresponde al peralte de estas vigas hasta el eje de la losa de cubierta (0,565 metros). De este modo se utilizaron cuatro elementos en cada una de las columnas.

En la cota 2,475 metros, se desarrolla la losa de entrepiso (476 elementos con una superficie máxima de 0,61 m²), las vigas longitudinales más los antepechos que bordean la losa y un mesón que surgen a partir de éstos últimos (723 elementos con una superficie máxima de 0,67 m²) En este nivel, cada viga maestra utiliza 17 elementos con una superficie menor a los 0,51m².

En el nivel 5,415 metros, para la construcción de la losa de cubierta se emplearon 608 elementos, no mayores a 1,10 m². A partir de la cubierta cuelgan los característicos paños de hormigón y vigas perimetrales en sus cuatro lados, que se componen de 720 elementos, en donde la superficie de cada uno no supera los 0,60 cm². Los tragaluces horizontales que surgen a partir de estos elementos aportan con 51 elementos (hasta 0,7m² cada uno).

Las vigas maestras, al igual que en la losa de entrepiso, utilizan en total 34 elementos, mientras que las vigas longitudinales emplean 576 elementos que consideran también los planos que conforman los ductos.

Ante la escasez de información respecto al proyecto estructural, se consultó la norma *ABNT NB1* (1960), referente al *Cálculo y Ejecución de Obras de Hormigón Armado*, para obtener los datos necesarios para efectuar el análisis. De este modo, se utilizó el esfuerzo medio a la compresión—1,25 veces la resistencia mínima a la compresión (150 kg/cm²)—es decir, el

valor asumido en el análisis es de 187,5 kg/cm² o 18,39 MPa. Es así que, a partir de la resistencia a compresión antes mencionada se obtiene un módulo de elasticidad de 20.157,329 MPa.

De acuerdo a la norma de la construcción ecuatoriana *NEC-SE-DS* (2014), se considera la siguiente información, relativa a los parámetros de las propiedades mecánicas. El coeficiente de Poisson es igual a 0,2, para la densidad del hormigón se emplea el valor de 0,0024 MN/m³ y una carga viva de 0,001 MN/m² para la losa de cubierta y 0,002 MN/m² para la losa de entrepiso. En relación a este último elemento, se considera también una carga muerta que comprende instalaciones eléctricas y sanitarias y el peso correspondiente al volumen de las paredes divisorias y muebles de concreto que se traduce en una carga de 0,00106 MN/m².

En el modelo, el empotramiento de la estructura ocurre en los nodos donde la estructura tiene contacto con el suelo, de modo que, tanto el movimiento como rotación de la vivienda han sido restringidos en dirección “X”, “Y” y “Z”, para poder realizar una lectura apropiada del análisis modal y espectral.

La función del espectro de Brasil, necesaria para la determinación de esfuerzos y deformaciones por cargas sísmicas, fue elaborada por el Ing. Hernán García. En ella se consideran los siguientes valores de acuerdo a la norma brasileña *Projeto 02:122.15-001* (2006) relacionada al *Proyecto de estructuras resistentes a sismos*:

En el estado de São Paulo—que según el mapa de aceleración sísmica horizontal de Brasil se ubica en la

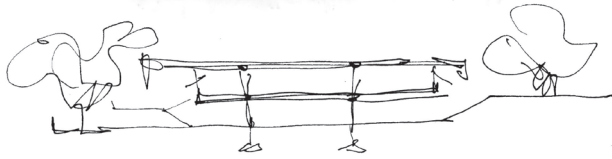


Figura 3.107. Boceto de la sección transversal de la Casa en Butantã

Fuente: Paulo Mendes da Rocha (s.f.) Cortesía de: Archivo oficina PMR

“zona 0”—, la aceleración espectral es de $0,025g$.

A partir de esta aceleración espectral, el valor de C_a —factor de amplificación sísmica del suelo para el período de $0,0s$ —es igual a $2,5$ y C_v —factor de amplificación sísmica del suelo para el período de $1,0 s$ —es igual a $3,5$ para una clase de terreno tipo “E” o suelo blando, ya que el suelo de la zona donde se ubica la residencia está constituido por “sedimentos arcillosos y arenosos” (Leinz & Carvalho, 1957).

3.4.2.4.2 Interpretación del modelo

a) Análisis modal

Modo 1. La torsión de las columnas ocasiona el movimiento de toda la estructura, en el que la losa de cubierta se mueve en mayor medida que la losa de entrepiso. En relación a la losa de cubierta—vista en planta—se observa como zonas de mayor desplazamiento, aquellas cercanas al tragaluz horizontal del desayunoador de la cocina.

Adicionalmente, en la losa de entrepiso, este movimiento ocasiona la flexión de las vigas maestras y nervios; en la losa de cubierta ocurre el mismo fenómeno, aunque en mucha menor medida (Fig.3.108). A este modo le corresponde un periodo de 0,629s.

Modo 2. Se trata de un movimiento diagonal, aunque predomina en la estructura, el desplazamiento lateral en "X", donde el desplazamiento relativo de la losa de cubierta es mayor que la losa de entrepiso.

En este modo—cuyo periodo es de 0,568s—es posible observar cómo se balancean los paños de hormigón que penden de las losas, en especial aquellos a partir de los cuales se originan los tragaluces. Producto de este movimiento, las losas se deforman en "s", aunque en la losa de entrepiso es más evidente este comportamiento de la losa (Fig.3.109).

Modo 3. En el movimiento diagonal característico de este modo—de periodo igual a 0,562s—, predomina el desplazamiento lateral en "Y" de la estructura—más claramente en la losa de cubierta respecto a la losa de entrepiso.

Similar al modo anterior, se advierte el movimiento de los paños de hormigón, aunque es más evidente en aquellos orientados en "X"—en los que, a partir de perforaciones, se originan los planos de los tragaluces. Además, la deformación en "s" de las losas ocurre—mayormente en la losa de entrepiso—en la dirección del movimiento (Fig.3.110).

Modo 4. Este modo ($T=0,299s$) corresponde a la flexión de la viga periférica del lado derecho de la cubierta. Esta deformación origina el movimiento de los otros dos paños laterales de hormigón en la losa de cubierta—que además se desplazan hacia afuera—y el pandeo del tramo de las columnas comprendido entre la losa de cubierta y entrepiso. Todas estas acciones se repercuten en la losa de entre piso que presenta un movimiento en "Z" en la región conformada por las columnas "A1", "A2", "B1" y "B2" (Fig.3.111).

Modo 5. Este modo—cuyo periodo es de 0,28s—se caracteriza por el movimiento de "tijera" de los paños de hormigón con perforaciones, lo que origina que las vigas que las arriostran se muevan en función de ellos. En la de menor peralte se advierte flexión, mientras que la del lado opuesto se encuentra bajo el efecto de torsión. En los paños de hormigón se observa además que, cuando ascienden se despliegan hacia afuera (Fig.3.112).

Apenas se advierte movimiento en la losa de entrepiso, consecuencia del pandeo de las columnas—originado por el movimiento de la cubierta—en el tramo comprendido entre la cota +2,475 m y +5,415 m.

Modo 6. En este caso la viga periférica de la izquierda se balancea, lo que ocasiona el movimiento de los

paños de hormigón—que tienden a abrirse. Además, cada uno de los volados de la viga maestra "A2-B2" se comprimen y traccionan de manera alternada a partir del movimiento del paño de hormigón (Fig.3.113).

El efecto de pandeo en las columnas se observa a lo largo de su desarrollo, es decir, en el tramo comprendido entre el suelo y primer nivel, y desde aquí hasta la losa de cubierta. Este modo se caracteriza por un periodo de 0,265s.

Modo 7. En este modo—de periodo igual a 0,255s—la excitación de la viga periférica "A1-B1", ocurre a manera de flexión en este elemento. Esto se traduce en un movimiento de los paños de hormigón paralelos, que se elevan y descienden simultáneamente (Fig.3.114).

En la losa de entrepiso se flexionan tanto las vigas maestras como los nervios, y, mientras las columnas "A1" y "B1" se pandean en "s", las columnas "A2" y "B2" presentan una flecha dictada a partir del movimiento de la losa de entrepiso.

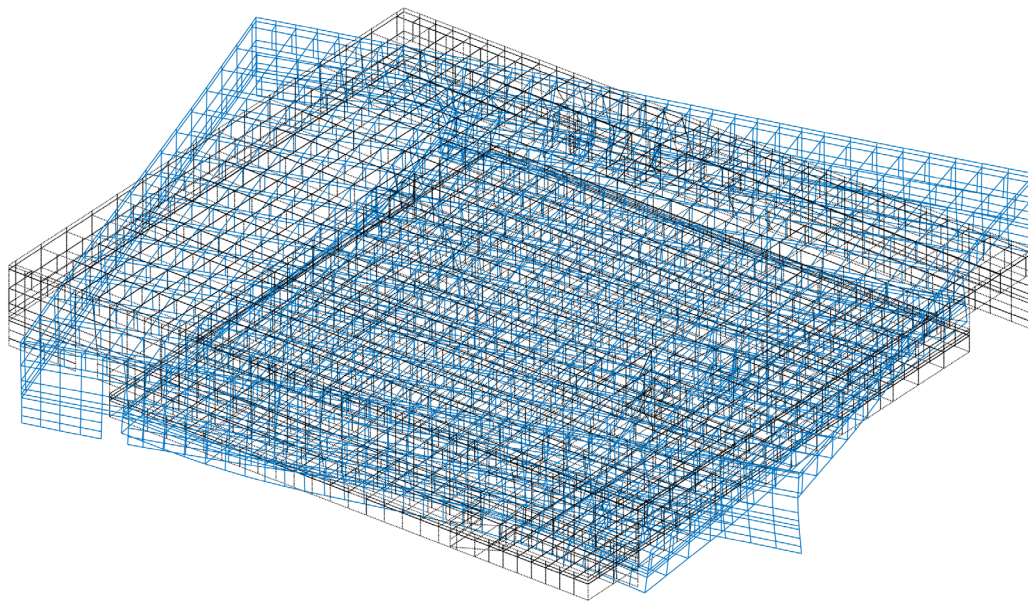


Figura 3.108. Primer modo de vibrar ($T=0,629s$) de la Casa en Butantã
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

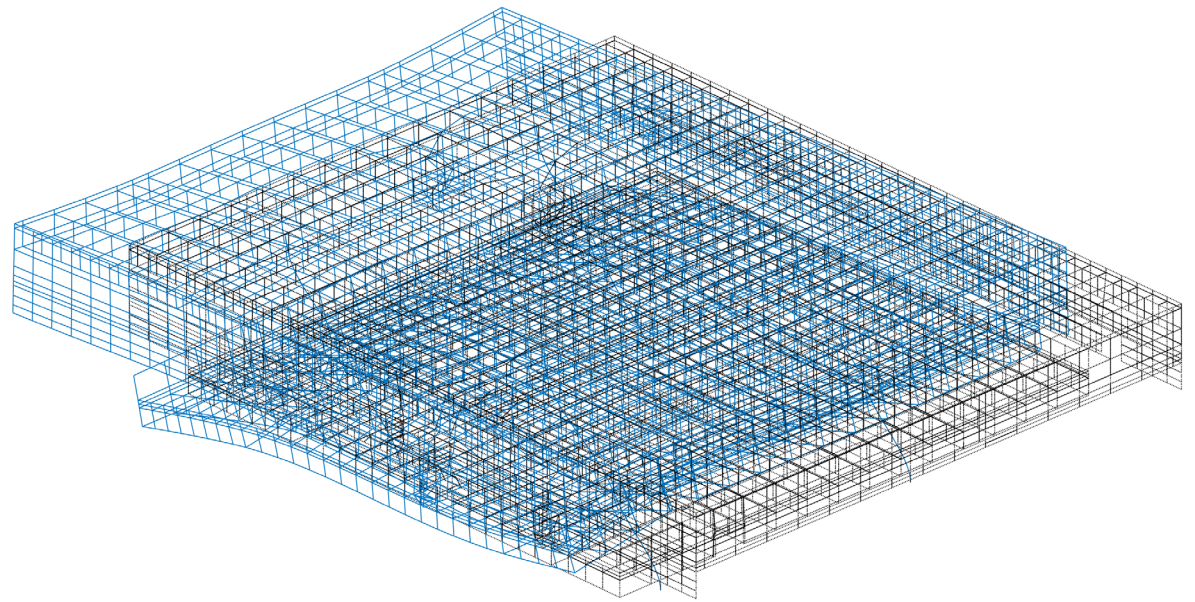


Figura 3.109. Segundo modo de vibrar ($T=0,568s$) de la Casa en Butantã
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

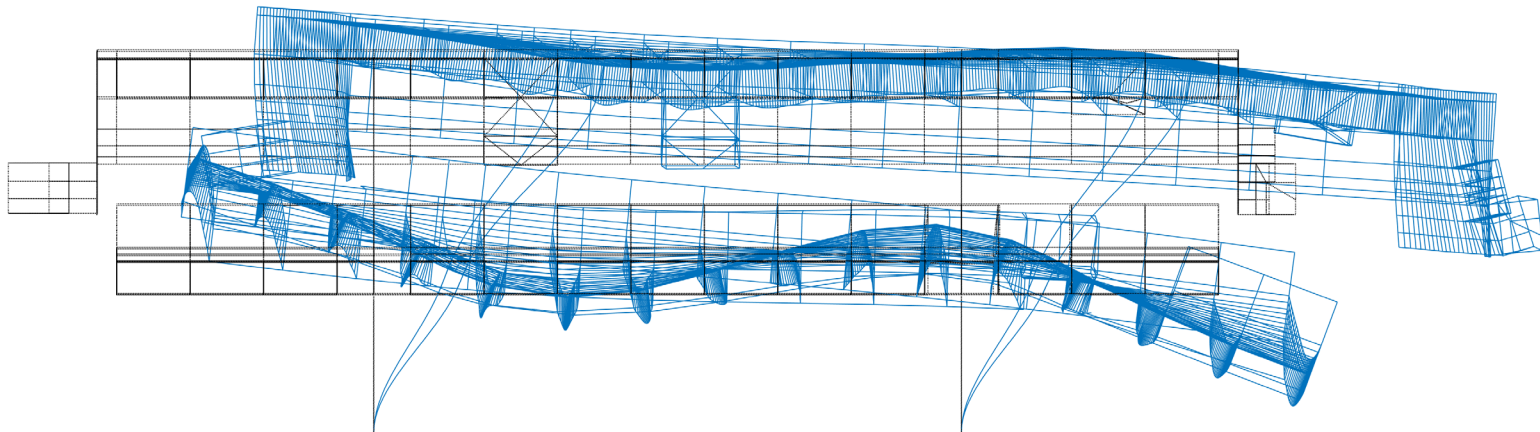


Figura 3.110. Tercer modo de vibrar ($T=0,562s$) de la Casa en Butantã

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

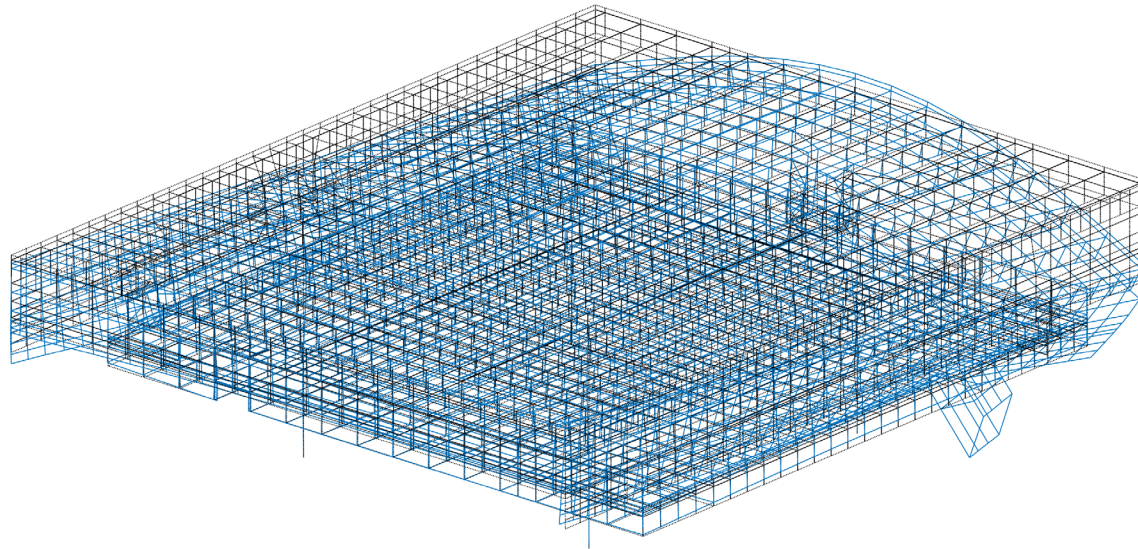


Figura 3.111. Cuarto modo de vibrar ($T=0,299s$) de la Casa en Butantã

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



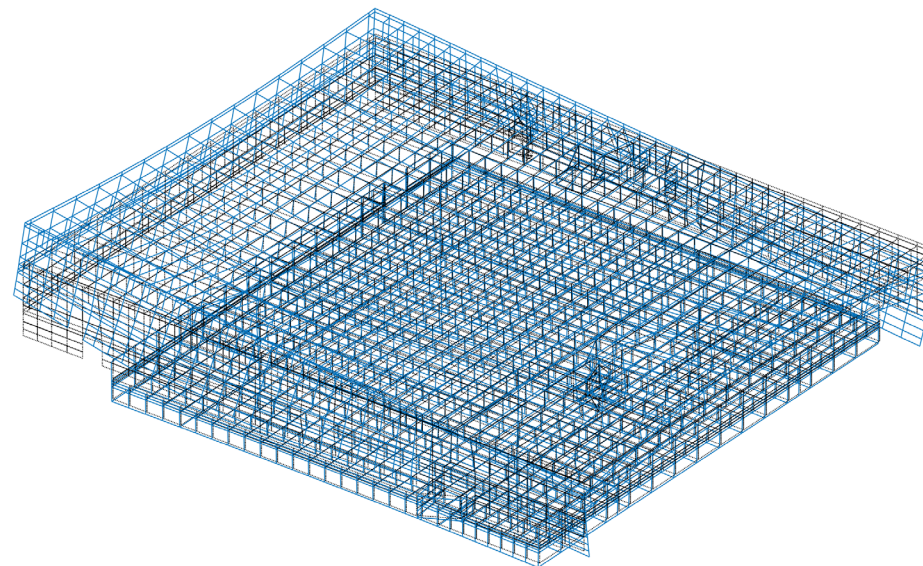


Figura 3.113. Séptimo modo de vibrar ($T=0,255s$) de la Casa en Butantã

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

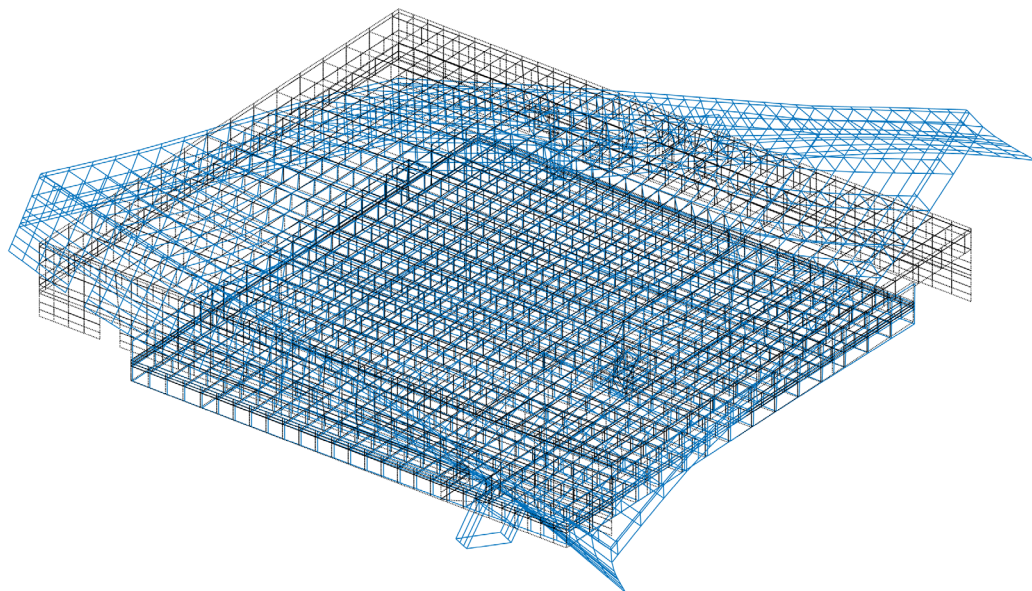


Figura 3.112. Quinto modo de vibrar ($T=0,28s$) de la Casa en Butantã

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

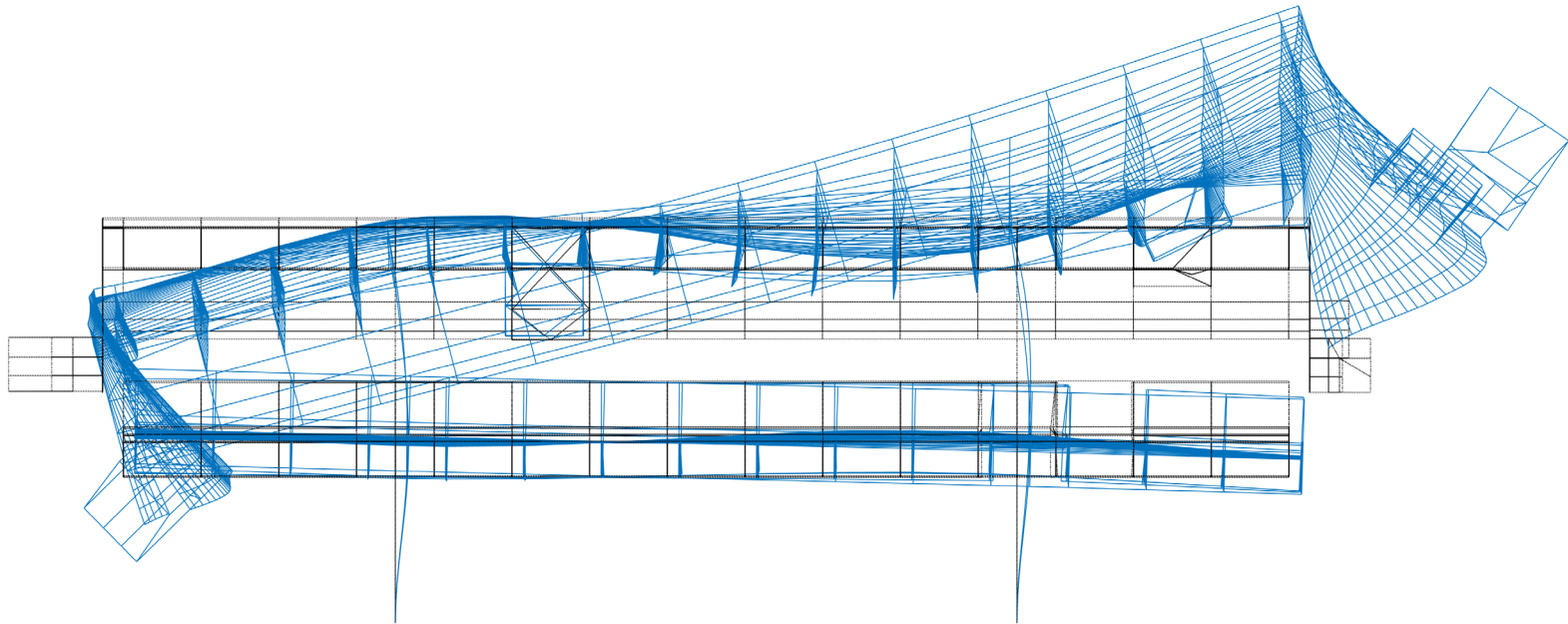
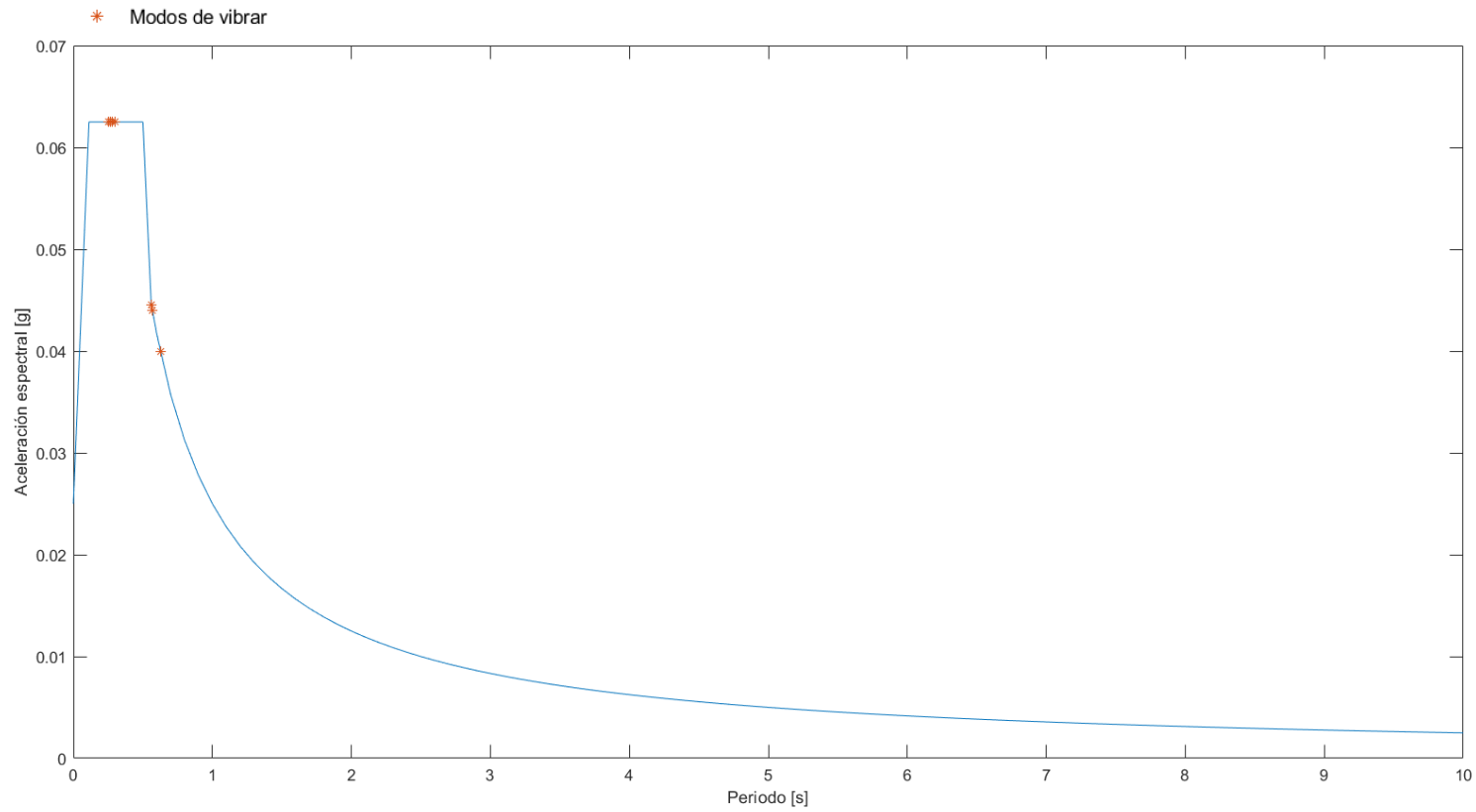


Figura 3.114. Sexto modo de vibrar ($T=0,265s$) de la Casa en Butantã
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0





NÚMERO DE MODO	PERIODO (s)	ACELERACIÓN ESPECTRAL (g)
1	0,629	0,0399
2	0,568	0,044
3	0,562	0,0445
4	0,299	0,0625
5	0,280	0,0625
6	0,265	0,0625
7	0,255	0,0625

Figura 3.115. Función del espectro de la Casa en Butantã

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

b) Espectro

A partir de la interpolación del período de la estructura con el del terreno y la aceleración espectral de este último, se obtiene la función del espectro, en la que han determinados de interés los modos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

El período y aceleración espectral de estos modos de vibrar resulta indispensable para cálculo de esfuerzos y desplazamientos es presentado en la figura 3.115, a partir del cual se observa como todos los modos de vibrar a excepción de los tres primeros, alcanzan la aceleración espectral máxima.

Con estos modos de vibrar de interés, es posible determinar que la aceleración espectral máxima tiene un valor de 0,0625g igual a $0,6131 \text{ m/s}^2$ que se le imprimirá a la masa de la estructura de la casa.

La masa total de la estructura es de 0,3288 MKg, por lo que la masa que más participa en "X" igual a 0,2702 MKg del segundo modo de vibrar equivale al 82,17% de la masa.

De este modo, la fuerza producida por el espectro en "X" es de 0,1656 MN.

En dirección "Y" mientras tanto, la masa con mayor participación le corresponde al tercer modo de vibrar y es igual a 0,2515 MKg equivalente al 76,49%.

Así la fuerza espectral en dirección "Y" es de 0,1541 MN.

c) Esfuerzos normales

Esfuerzo normal "sx" en función de fuerza modal "sjx".

En este caso es posible realizar una lectura de la losa y su nervadura. En relación a estos últimos, en la cota +2,475 m, si se toma como referencia el tramo comprendido por las columnas "A2" y "B2", se advierten esfuerzos que oscilan entre -1,09 MPa y -11,95 MPa en los nervios, presentándose las concentraciones más altas de esfuerzos en aquellos próximos a las columnas; mientras que, los esfuerzos de los nervios centrales van de los 0,17 MPa hasta los 5,92 MPa (Fig.3.116).

En los nervios que intersectan el tramo "A1-B1" de la viga maestra, los esfuerzos más elevados ocurren en la región próxima a la columna "B1", hacia afuera alcanzando los -11,95 MPa. Del mismo modo, los nervios centrales y de los extremos están sometidos a esfuerzos menores. A medida que los nervios se aproximan a los extremos, los esfuerzos máximos son de 4,01 MPa (Fig.3.116).

En el caso de la losa de entepiso mientras tanto, se pueden observar tres "manchas" (Fig.3.117). Una siguiendo el eje longitudinal de cada viga maestra, y una entre estos elementos. En el caso de la viga maestra "A1-B1", los esfuerzos varían entre 1,45 MPa y 3,37 MPa, concentrándose los mayores esfuerzos en torno a las columnas. Para la viga maestra "A2-B2", los esfuerzos alcanzan hasta los 4,01 MPa cerca de las columnas, y a diferencia de la otra viga maestra, los esfuerzos se muestran como superiores y se desarrollan en una superficie más amplia.

En la cota +5,415 m, la distribución de los esfuerzos

normales de los nervios—que alcanzan los -8,76 MPa—es similar a la expuesta en losa de entepiso. En relación a los nervios, los tramos entre las columnas están sujetos a esfuerzos normales menores y a compresión que varían entre 0,81 MPa y -3,65 MPa.

En la losa de cubierta—como en la de entepiso—, se observan dos "manchas" claras en torno a las vigas maestras. En el caso de la viga maestra A1-B1, se presentan esfuerzos entre 1,45 MPa y hasta 4,01 MPa. Estos últimos ocurren en el encuentro entre las columnas y losa, además en el sentido de la viga existen esfuerzos de hasta 2,41 MPa. En el caso de la viga "A2-B2", los esfuerzos en el encuentro entre losa y columna es menor que la anterior, esto es: 3,69 MPa, sin embargo, en este elemento, los esfuerzos en dirección de la viga alcanzan los 2,73 MPa. Los mayores esfuerzos en la losa de cubierta se registran en la zona de los nervios subsiguientes a los paños de hormigón—a partir de los cuales se conforman los canales de recolección de agua—donde los esfuerzos ascienden a los 5,29 MPa (Fig.3.118). Adicionalmente, no se observa que en torno a ductos de chimenea y cocina surjan los mayores esfuerzos.

Ya en los paños de hormigón, y siguiendo la línea de las vigas maestras, el mayor esfuerzo en estos elementos es de 3,37 MPa. Además, se registran esfuerzos importantes de hasta -4,29 MPa donde se cortan planos perpendicularmente como por ejemplo en la intersección de los paños de hormigón del perímetro de la losa o elementos horizontales que nacen de los paños de hormigón para generar tragaluces horizontales (Fig.3.119).

En relación a estos últimos elementos, el tragaluz



ubicado en el desayunoador de la cocina presenta los esfuerzos mayores. En el área cercana a su vértice más alejado, el esfuerzo es de 7,20 MPa, y en la región del plano vertical a partir de la cual nace el plano horizontal del tragaluz el esfuerzo es de -9,40 MPa, a partir de la cual nace el plano horizontal del tragaluz (Fig.3.119).

Esfuerzo normal “sx” en función de fuerza modal “sjy”.

Si bien la lógica de distribución en este caso es la misma en relación al esfuerzo normal “sx” en función de la fuerza modal “sjy”, se advierte ciertas diferencias. En el caso de la losa de entrepiso, el tramo de la viga maestra “A1-B1”, si bien la concentración de esfuerzos sigue ocurriendo en torno a la columna, ahora se han distribuido también a lo largo del elemento (Fig.3.120). Los nervios de la losa de entrepiso mientras tanto, se encuentran ahora sometidos a un esfuerzo máximo de -12,69 MPa, aumentando 0,75 MPa respecto al anterior. En la losa de cubierta, si bien los mayores esfuerzos aparecen a partir de las vigas maestras, ahora el espacio entre ellas está sujeto a esfuerzos no menores a 0,43 MPa (Fig.3.121).

Esfuerzo normal “sy” en función de fuerza modal “sjx”.

La gráfica indica que, a partir de los dos nervios subsiguientes de cada columna, la losa experimenta esfuerzos de -7,55 MPa. Estos esfuerzos se advierten también hacia los nervios periféricos en ambos sentidos, así como en las esquinas de la losa. Mientras tanto, la franja comprendida entre las columnas “A1” y “A2” y “B1” y “B2” los esfuerzos son menores (-0,005 MPa) y en la zona de las columnas se concentran esfuerzos de

hasta 15,09 MPa (Fig.3.122). Estos esfuerzos también aparecen en gran parte de las vigas de borde ubicados a lo largo de la sala y el estudio (Fig.3.123).

En las vigas maestras de la losa de cubierta mientras tanto, se observa que los esfuerzos se distribuyen de manera homogénea con valores entre 7,55 MPa y -18,88 MPa. Estos últimos valores aparecen entre la columna y la fibra inferior del nervio tanto en la losa de entrepiso como cubierta (Fig.3.123). Mientras tanto, en la losa de cubierta, los mayores esfuerzos (-7,55 MPa) se sitúan en las esquinas, en zonas cercanas a los puntos medios de los paños de hormigón que se desarrollan en dirección de “X” y en los tramos “A1-B1” y “A2-B2” comprendido entre las columnas. Adicionalmente, en la cubierta donde se unen las columnas “A2” y “B2” con la cubierta aparecen esfuerzos de 7,54 MPa (Fig.3.124).

Los planos verticales de dos de los tres los tragaluces horizontales se muestran como elementos cuyos esfuerzos varían entre 7,54 MPa y -7,55 MPa, mientras que, en el tragaluz del desayunoador ocurren los mayores esfuerzos puntuales (181,15 MPa y -45,29 MPa).

Esfuerzo normal “sy” en función de fuerza modal “sjy”.

Las diferencias respecto al esfuerzo normal “sy” en función de la fuerza “sjx” son las siguientes. En relación a la losa de entrepiso y de cubierta, la magnitud y ubicación de los esfuerzos es la misma, sin embargo, los esfuerzos mayores se distribuyen sobre una superficie más amplia (Fig.3.125). De la misma manera que el caso anterior del esfuerzo normal en “sy”, la

concentración de los mayores esfuerzos se encuentra ubicados en el tragaluz del desayunoador con valores que varían entre 176,31 MPa y -43,82 MPa.

Esfuerzo normal “sz” en función de fuerza modal “sjx”.

La edificación casi en su totalidad presenta esfuerzos de -0,61 MPa, a excepción de esfuerzos puntuales (80,60 MPa a -14,33 MPa) en el ducto de la chimenea de la sala (Fig.3.126).

Esfuerzo normal “sz” en función de fuerza modal “sjy”.

La edificación casi en su totalidad presenta esfuerzos de 4,78 MPa, a excepción de esfuerzos puntuales (79,28 MPa a -13,83 MPa) en el ducto de la chimenea de la sala (Fig.3.127).

d) Desplazamientos: deriva

A partir de los lados que conforman la planta en la losa de entrepiso, se han establecido planos verticales de referencia para el cálculo de la deriva. Cada uno de los lados han sido denominados de acuerdo a las columnas, así, por ejemplo, el lado “A2-B2”, hace referencia al tramo comprendido entre dichas columnas.

En relación a la losa de entrepiso (h=2,475m)

En el lado “A2-B2”, el mayor desplazamiento es de 0,0025 metros—producto del sismo en “x”—, y ocurre en el nodo 448, ubicado sobre el vértice A2 de la losa de entrepiso; mientras la deriva de este plano es de 0,00101 (Fig.3.128).

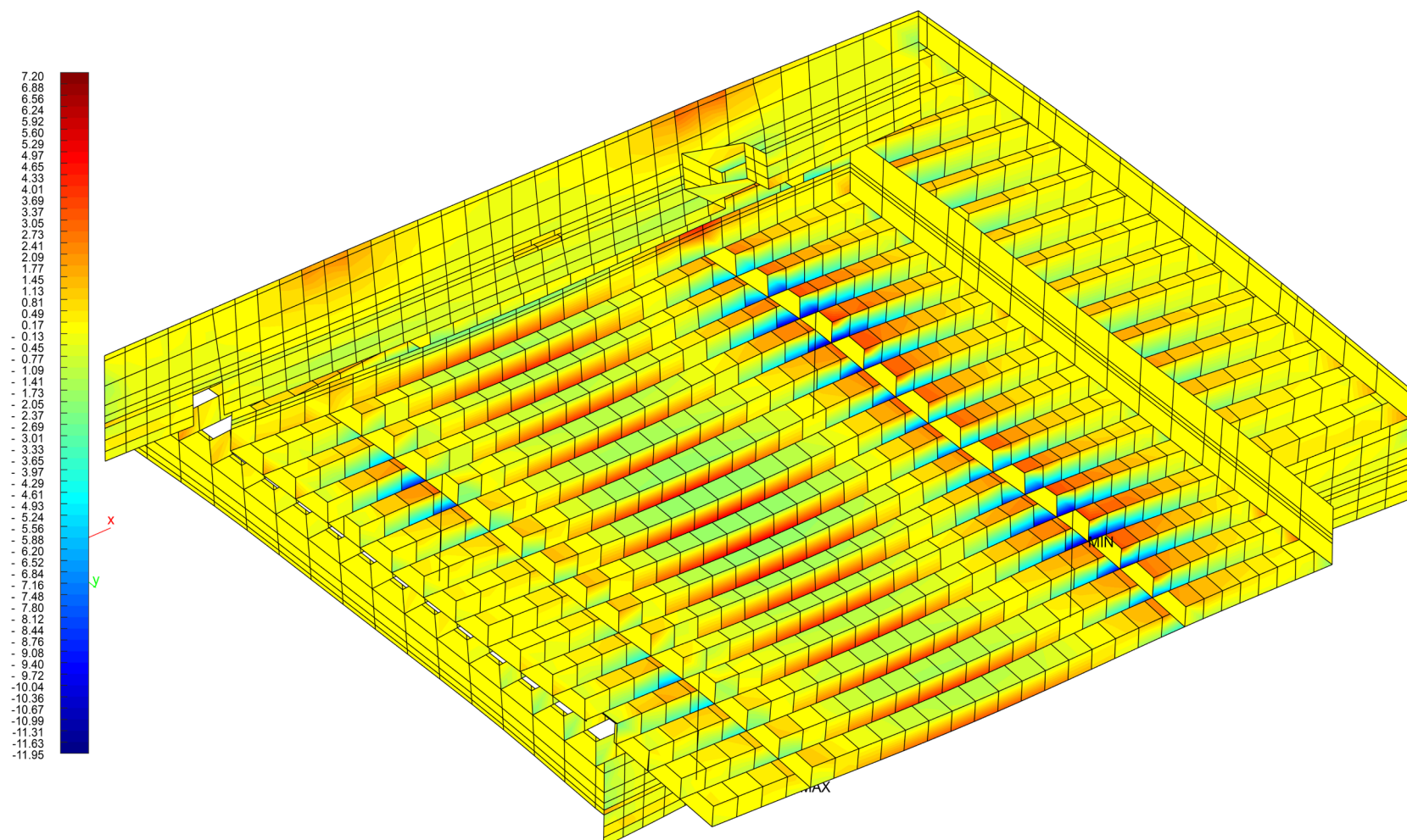


Figura 3.116. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de fuerza modal "sjx". Vista axonométrica de la losa de entepiso

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



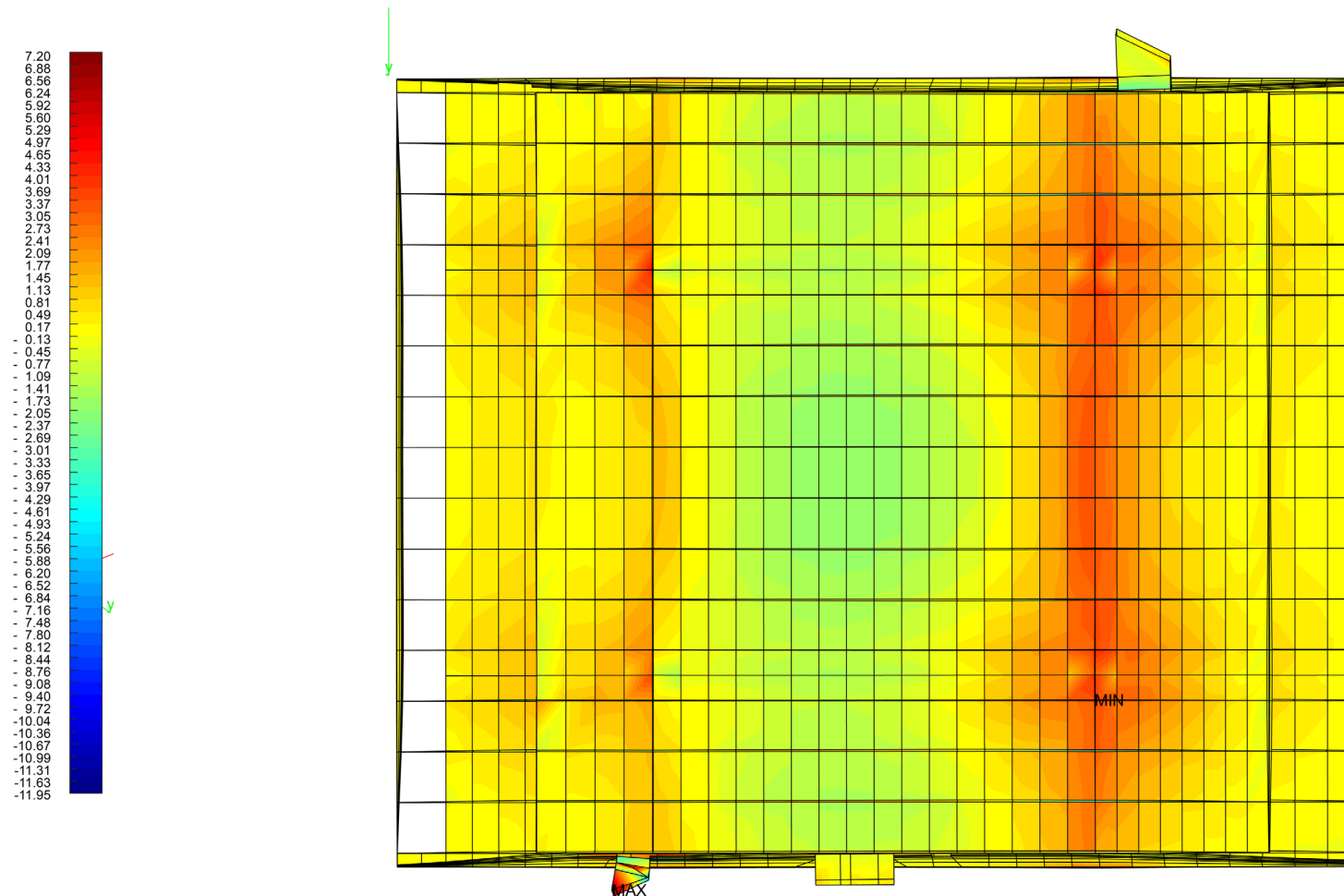


Figura 3.117. Esfuerzo normal “sx” (MPa) en función de fuerza modal “sjx”. Vista en planta de la losa de entrepiso

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

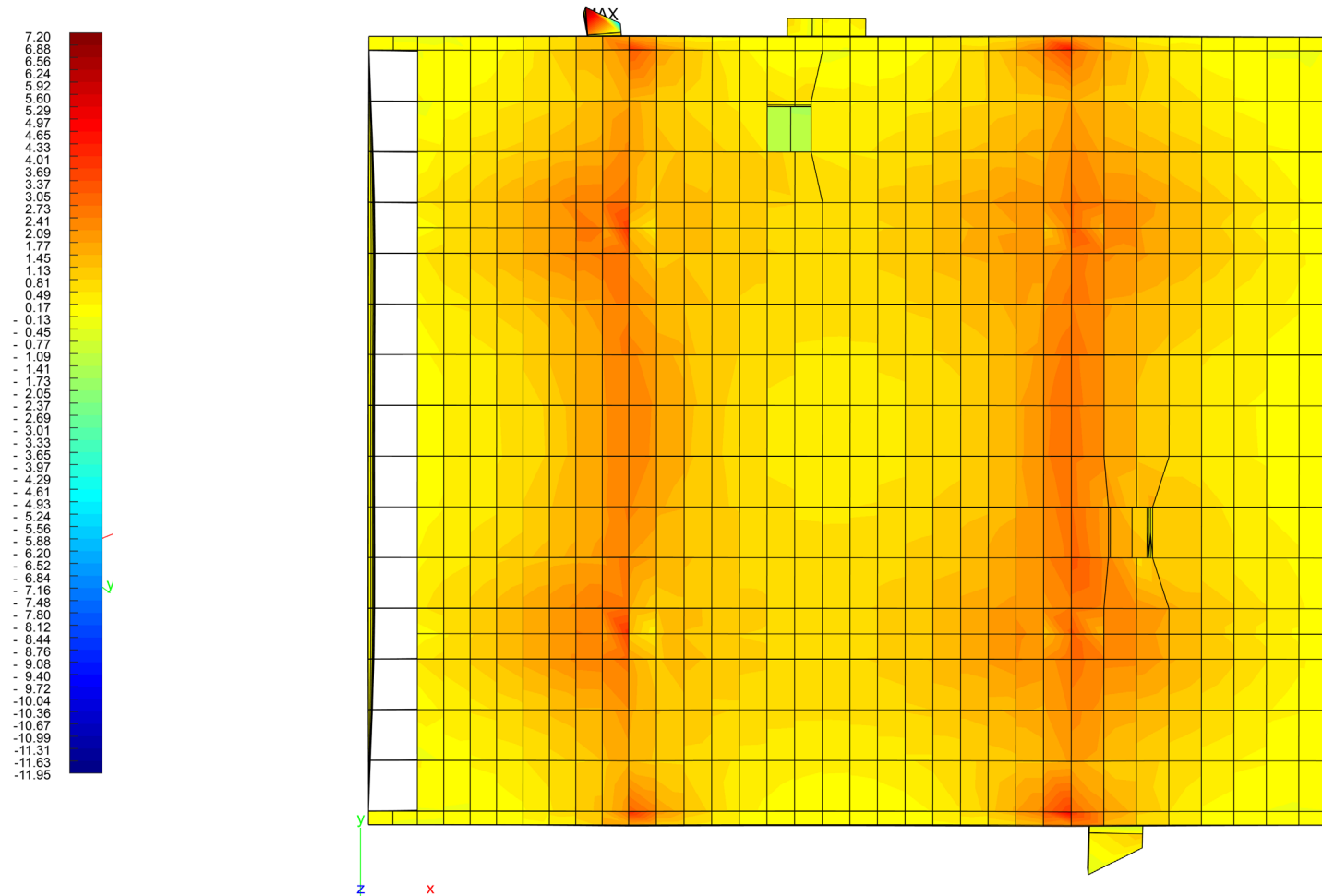


Figura 3.118. Esfuerzo normal “sx” (MPa) en función de fuerza modal “sjx”. Vista en planta de la losa de cubierta

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



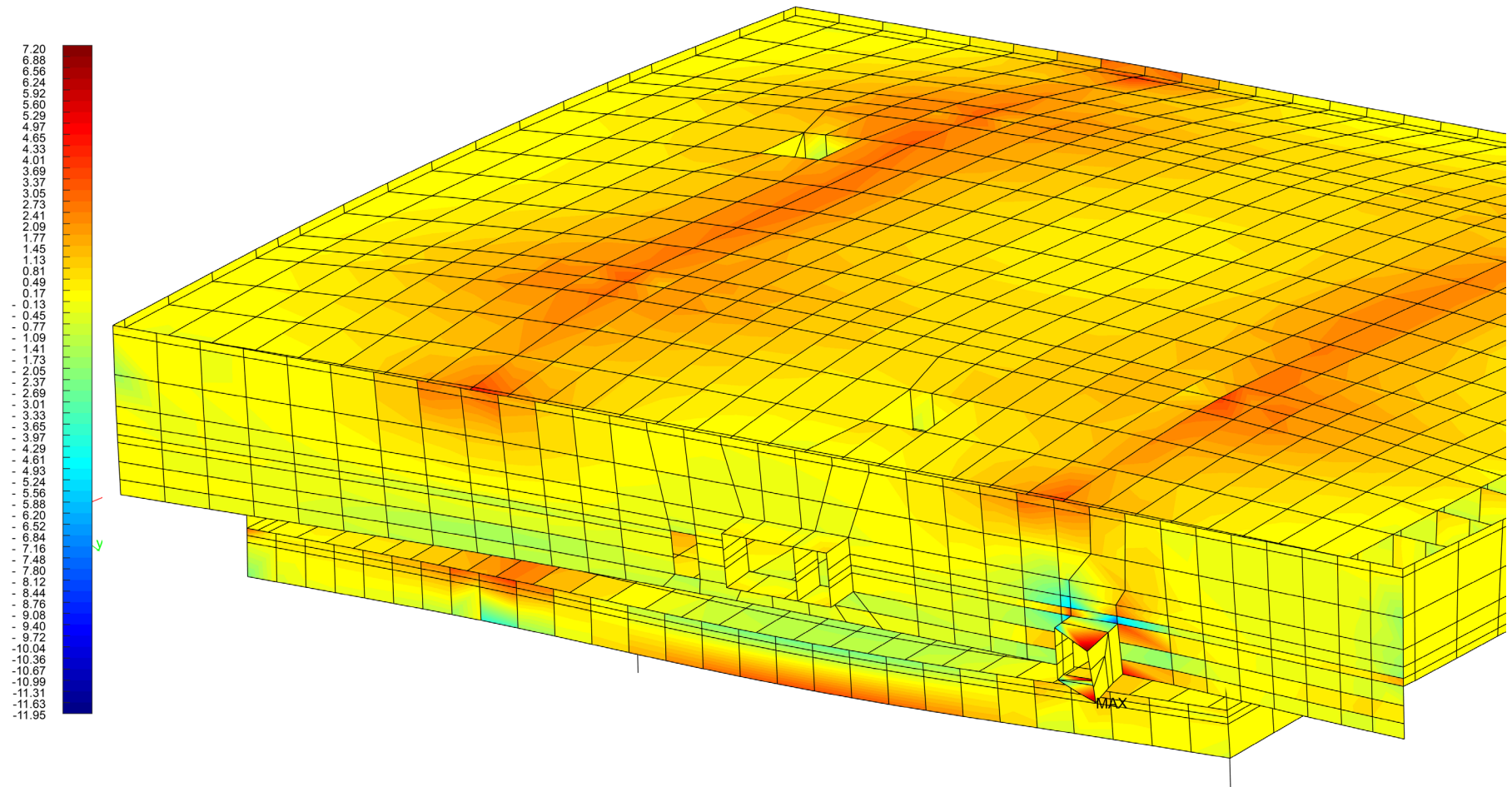


Figura 3.119. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de fuerza modal "sjx". Vista axonómica del tragaluz de la cocina

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

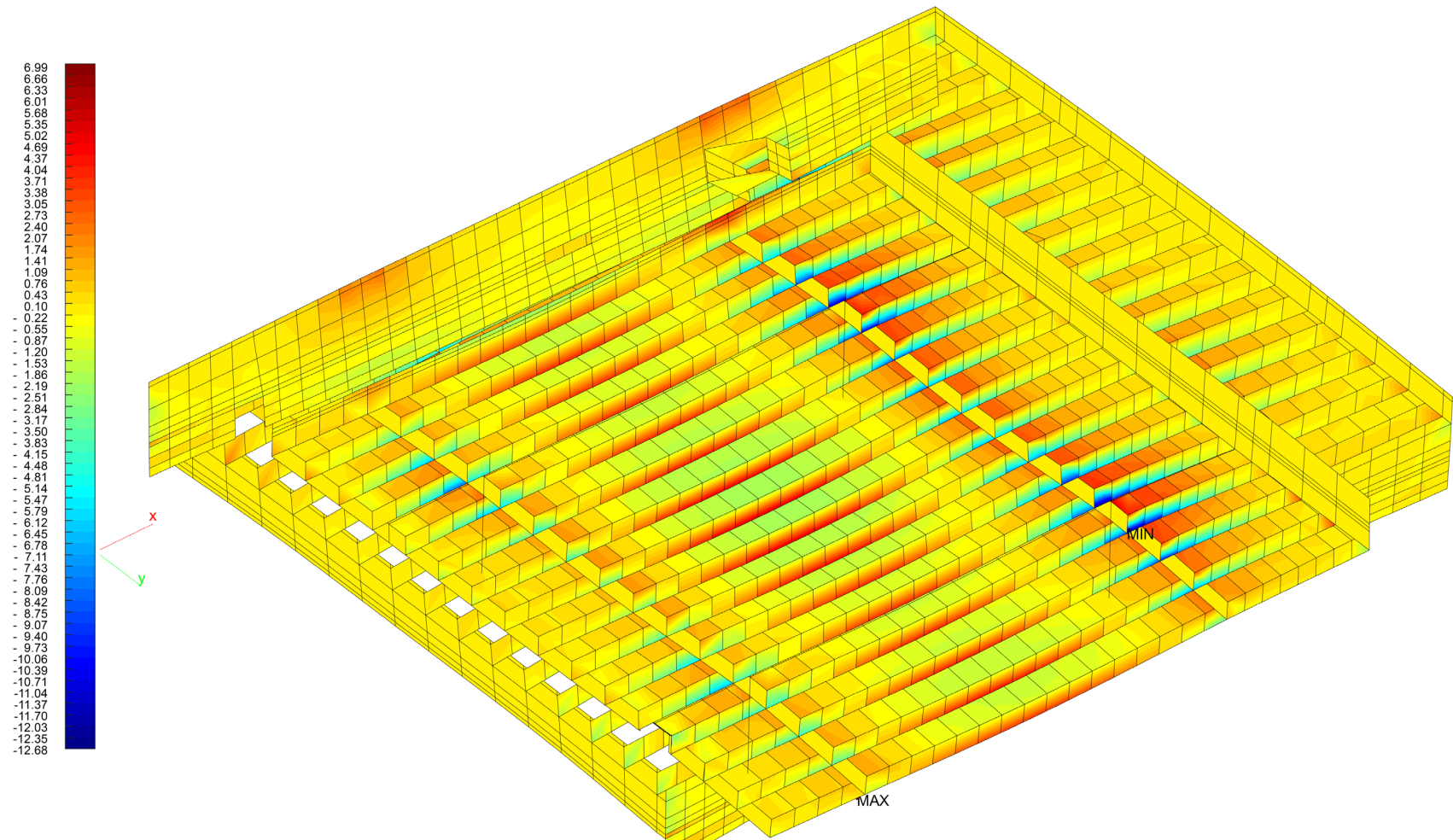


Figura 3.120. Esfuerzo normal " s_x " (MPa) en función de fuerza modal " s_{jy} ". Vista axonométrica de la losa de entrepiso

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



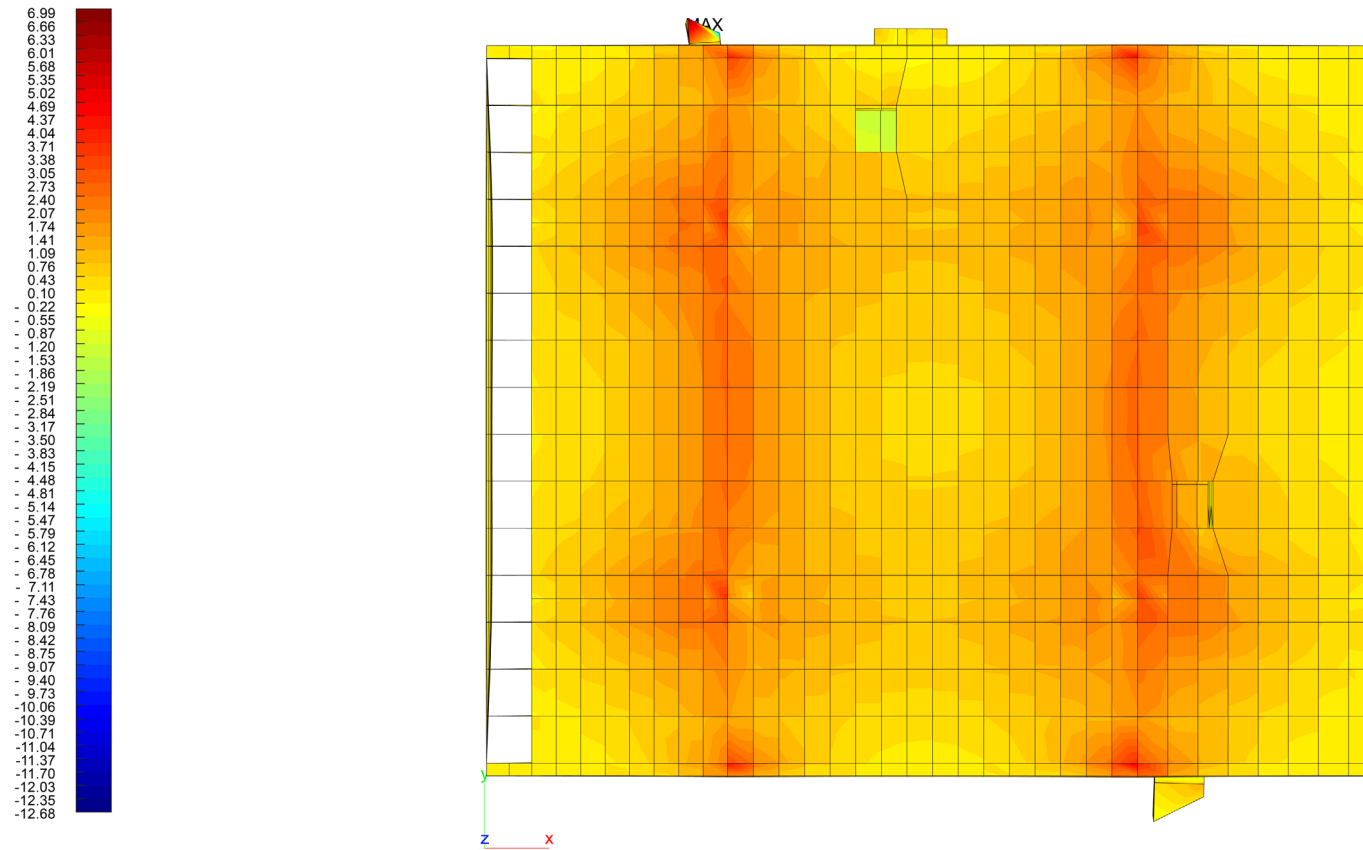


Figura 3.121. Esfuerzo normal " s_x " (MPa) en función de fuerza modal " s_{jy} " en la losa de cubierta

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

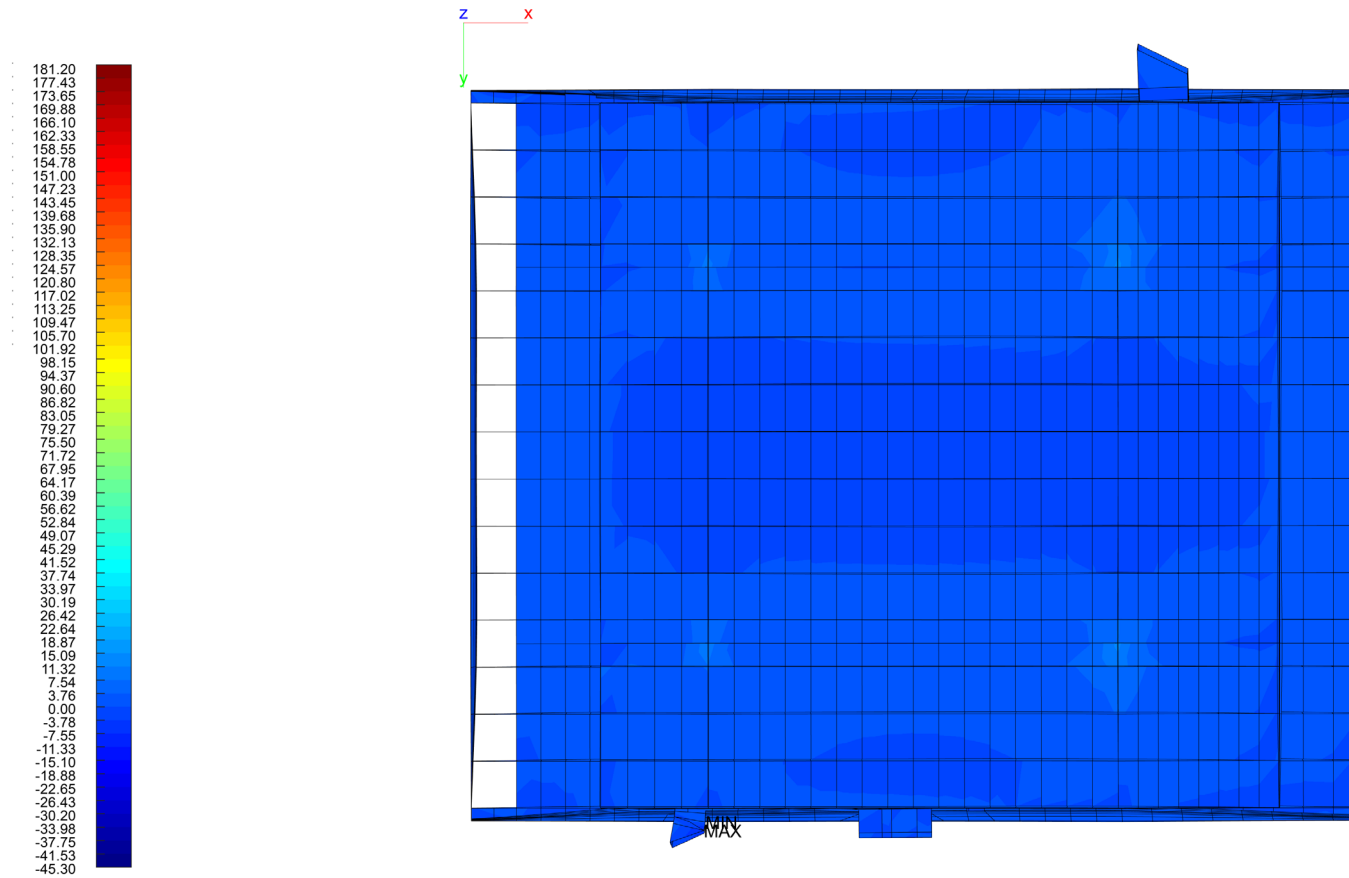


Figura 3.122. Esfuerzo normal “sy” (MPa) en función de fuerza modal “sjx” en la losa de entrepiso

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



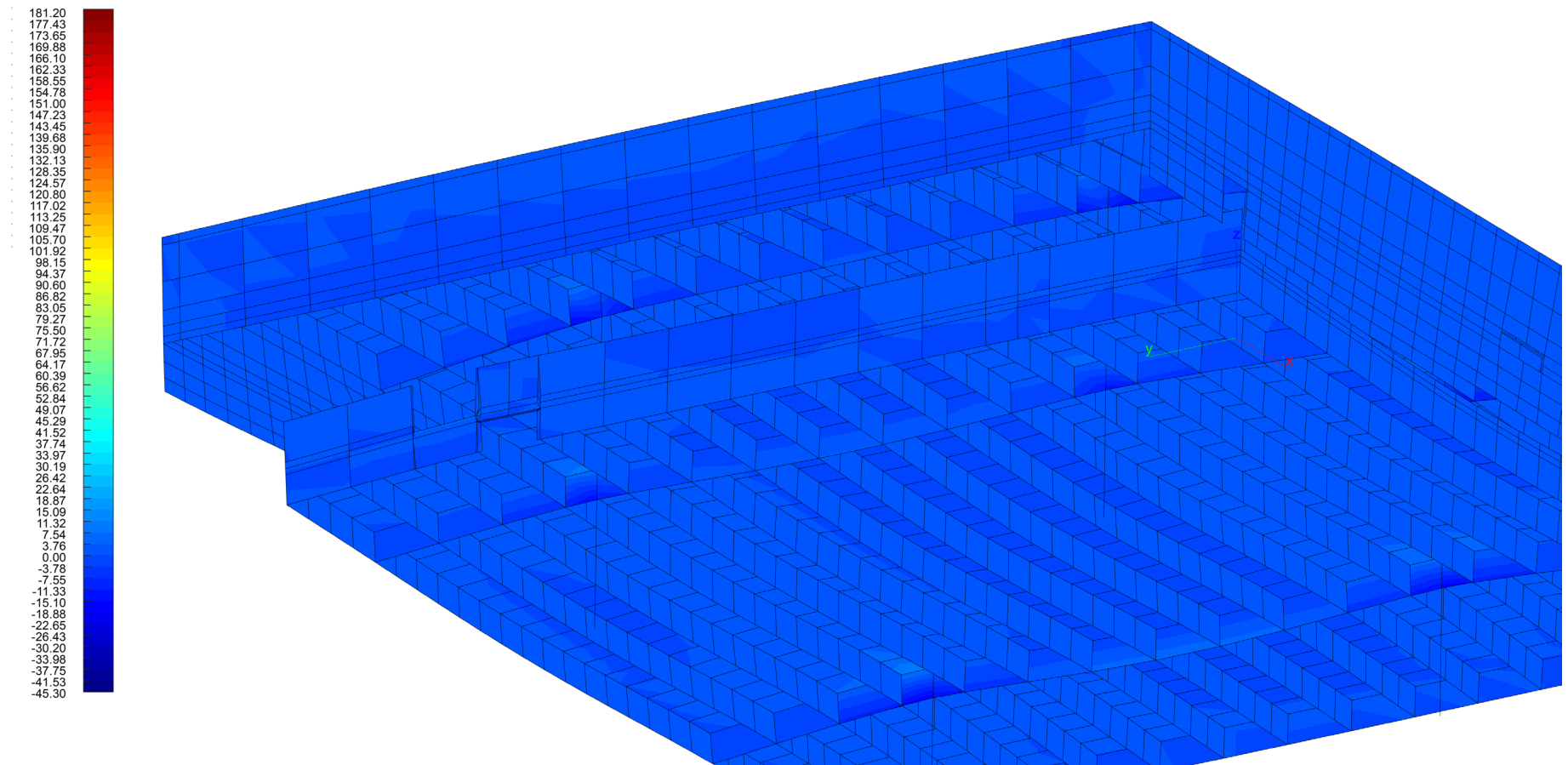


Figura 3.123. Esfuerzo normal "sy" (MPa) en función de fuerza modal "sjx" en la viga de borde del estudio y viga maestra "A1-B1"

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

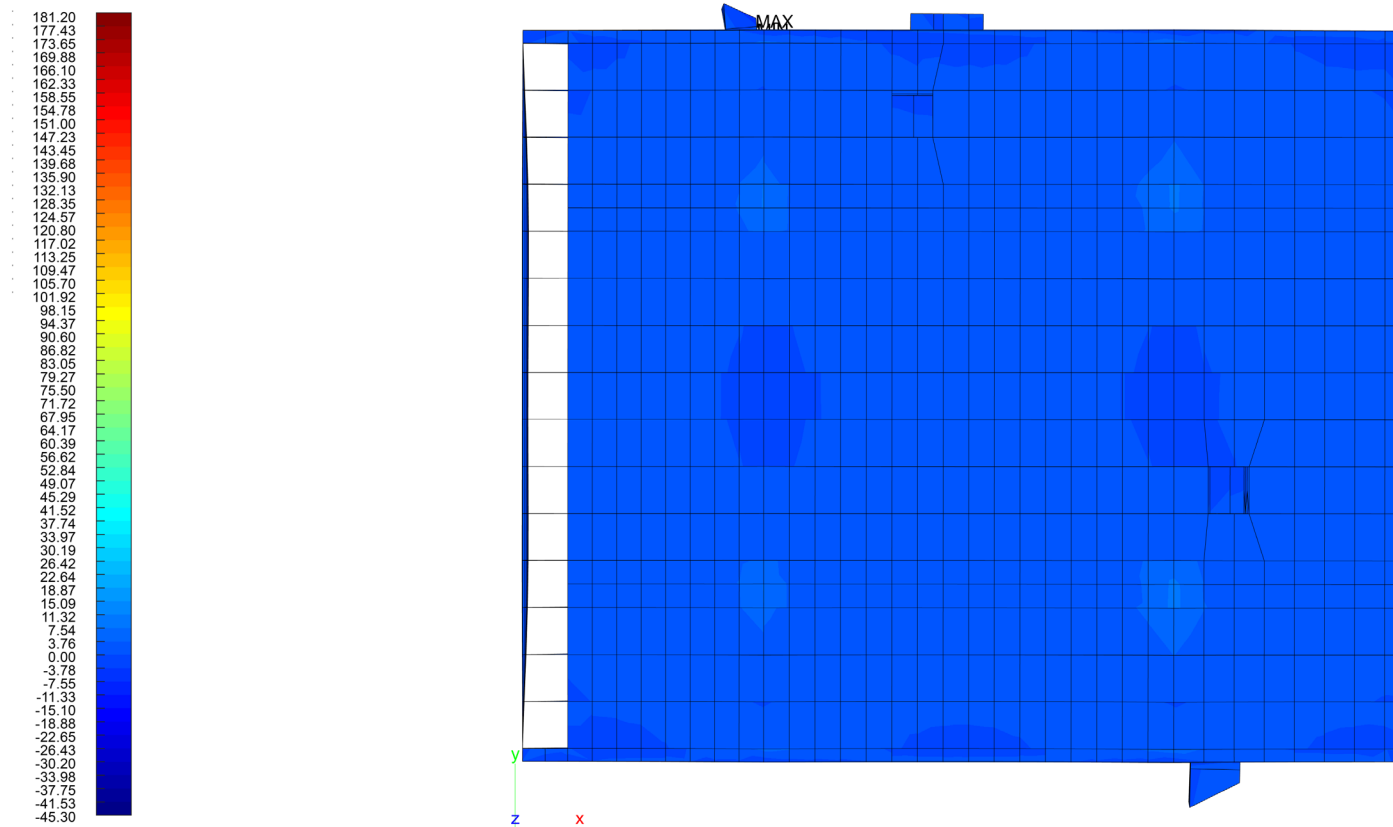


Figura 3.124. Esfuerzo normal “sy” (MPa) en función de fuerza modal “sjx” en la losa de cubierta

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



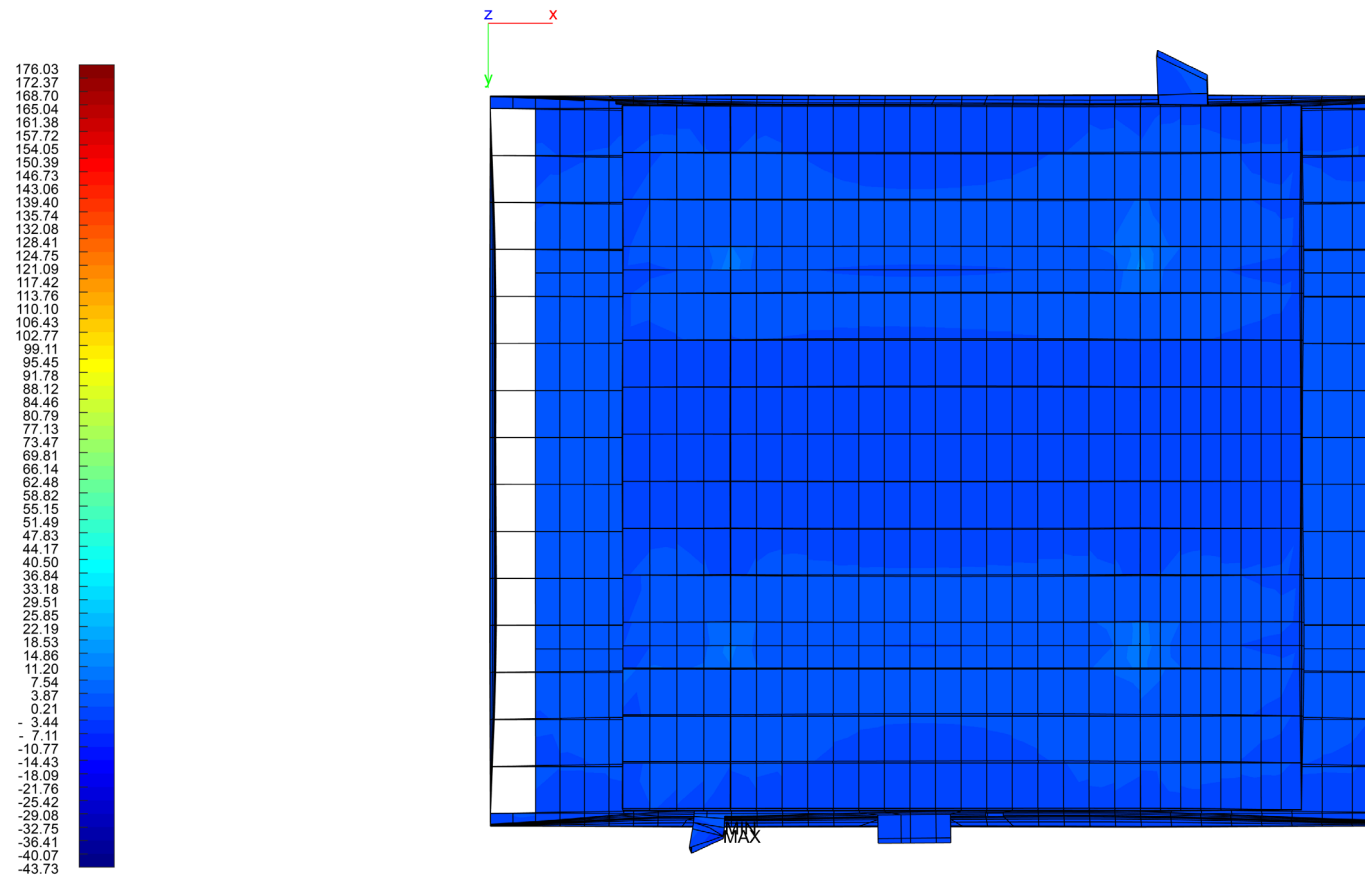


Figura 3.125. Esfuerzo normal "sy" en función de fuerza modal "sjy" en la losa de entrepiso

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

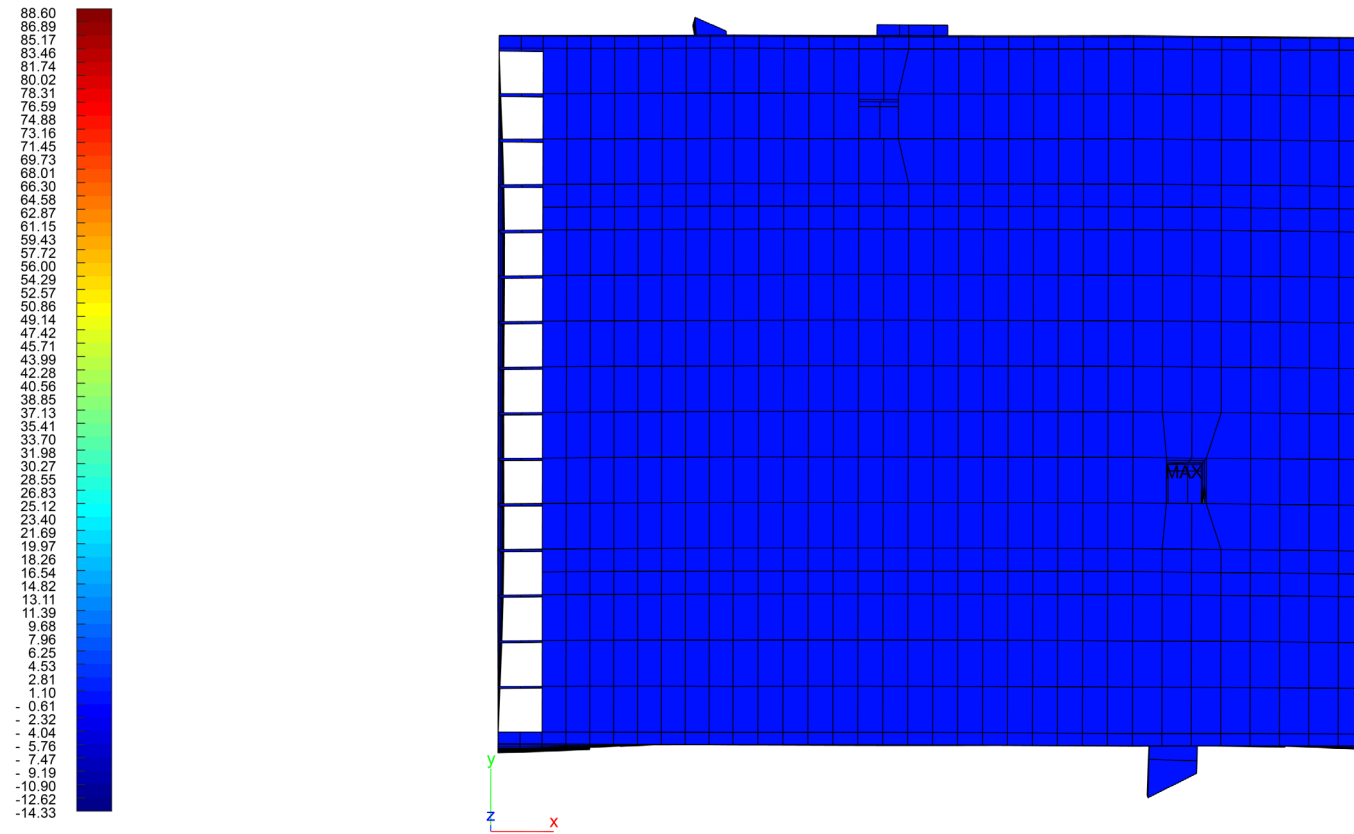


Figura 3.126. Esfuerzo normal "sz" en función de fuerza modal "sjx" en la losa de entrepiso

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



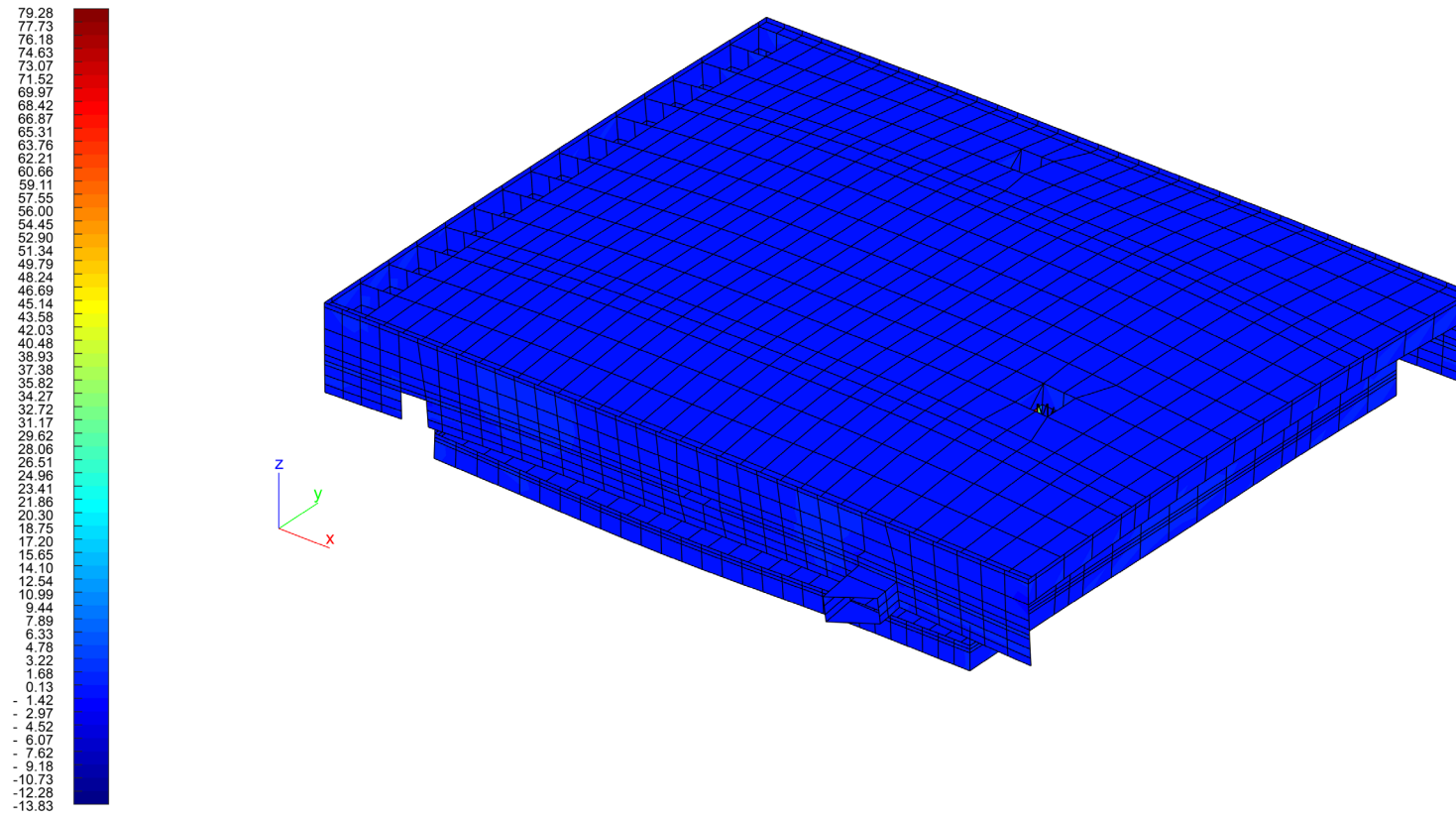


Figura 3.127. Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjy" en la losa de cubierta

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

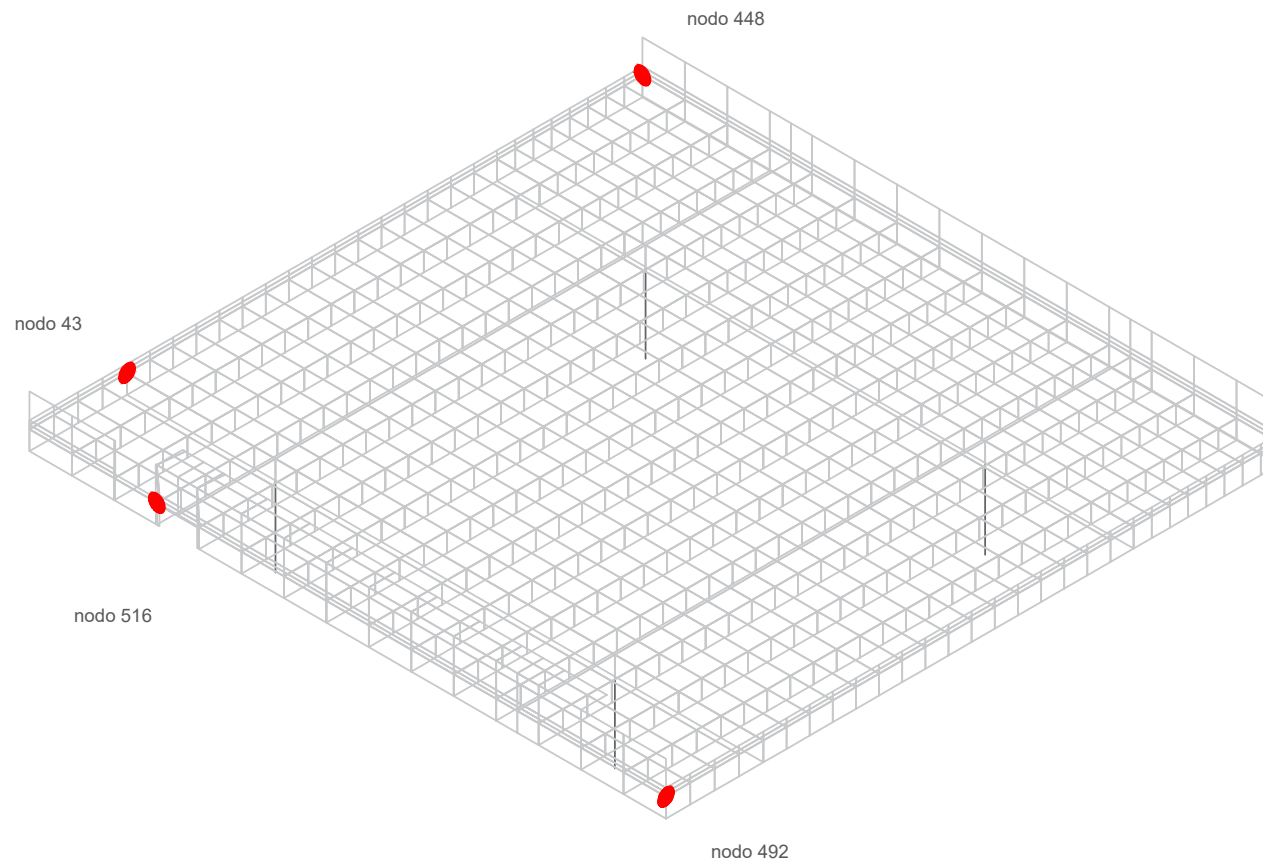


Figura 3.128. Nodos de la losa de entepiso que presentan mayores desplazamientos para el cálculo de la deriva de la Casa en Butantã. Esc 1:125

Elaboración: Autor



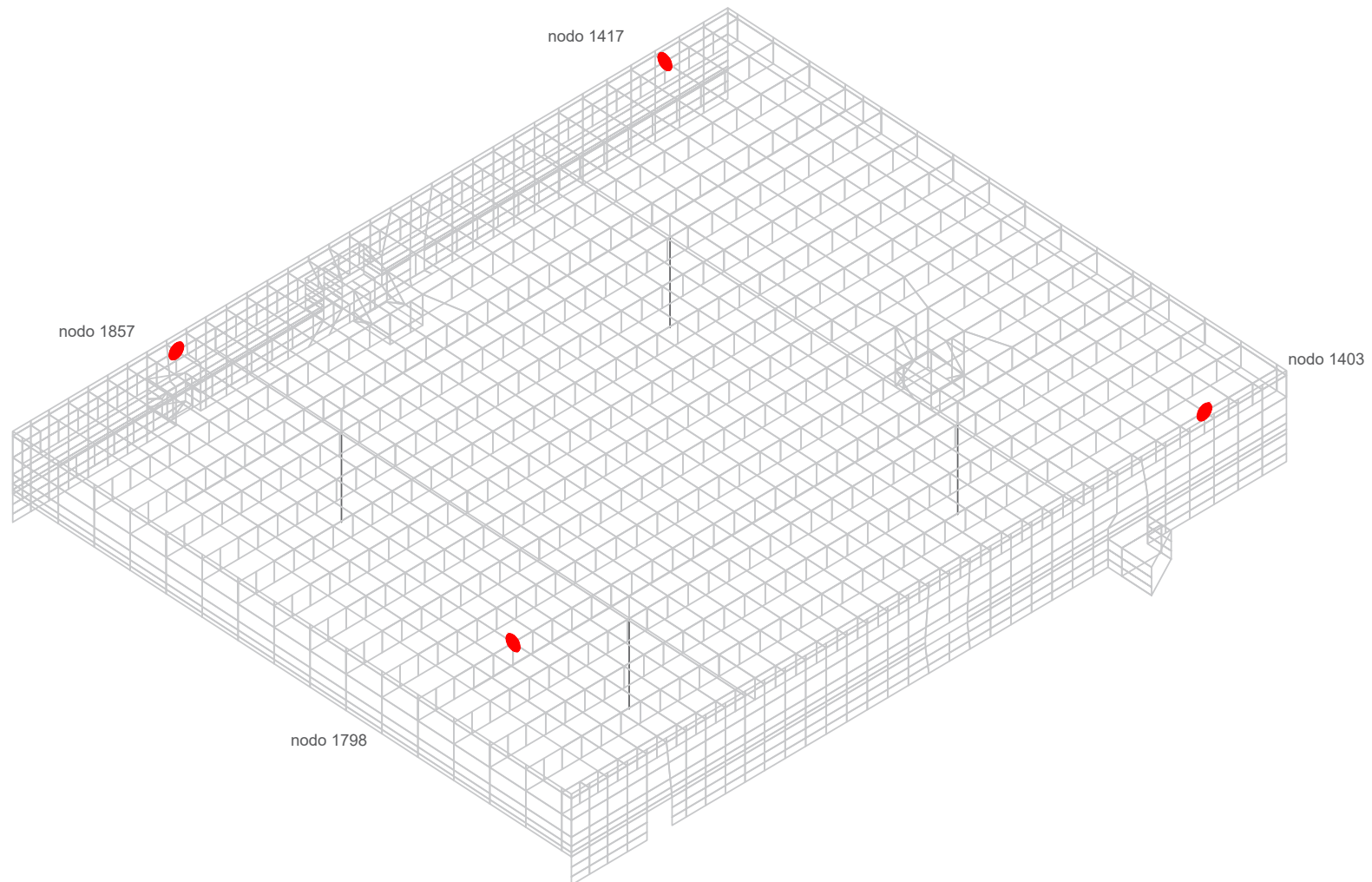


Figura 3.129. Nodos de la losa de cubierta que presentan mayores desplazamientos para el cálculo de la deriva de la Casa en Butantã. Esc 1:125

Fuente: Dibujo autor

En el lado “A1-A2”, el mayor desplazamiento es de 0,0021 metros—producto del sismo en “y”—, y ocurre en el nodo 43, ubicado a 4,26 metros del vértice “A1”; mientras la deriva de este plano es de 0,00084 (Fig.3.128).

En el lado “A1-B1”, el mayor desplazamiento es de 0,0025 metros—producto del sismo en “x”—, y ocurre en el nodo 516, ubicado en el nervio subsiguiente a la columna “B1”; mientras la deriva de este plano es de 0,001 (Fig.3.128).

En el lado “B1-B2”, el mayor desplazamiento es de 0,0019 metros—producto del sismo en “y”—, y ocurre en el nodo 492, ubicado en el nervio que marca el desarrollo de la grada; mientras la deriva de este plano es de 0,00076 (Fig.3.128).

En relación a la losa de cubierta (h=5,415m)

En el lado “A2-B2”, el mayor desplazamiento es de 0,0058 metros—producto del sismo en “x”—, y ocurre en el nodo 1417, ubicado sobre el vértice “A2” de la losa de entepiso; mientras la deriva de este plano es de 0,00112 (Fig.3.129).

En el lado “A1-A2”, el mayor desplazamiento es de 0,0046 metros—producto del sismo en “y”—, y ocurre en el nodo 1857, ubicado sobre el tragaluz del desayunador; mientras la deriva de este plano es de 0,00085 (Fig.3.129).

En el lado “A1-B1”, el mayor desplazamiento es de 0,0055 metros—producto del sismo en “y”—, y ocurre en el nodo 1798, ubicado en el nervio subsiguiente a la columna “B1”; mientras la deriva de este plano es de

0,00102 (Fig.3.129).

En el lado “B1-B2”, el mayor desplazamiento es de 0,0042 metros—producto del sismo en “x”—, y ocurre en el nodo 1403, ubicado sobre el vértice “B2” de la losa de entepiso; mientras la deriva de este plano es de 0,00078 (Fig.3.129).

e) Participación de la masa

En relación a la participación de la masa, es el segundo modo de vibrar aquel que destaca en dirección “X” al transportar el 82,17% de la masa, mientras el primer modo representa apenas el 0,02% y el tercer modo el 2,81%.

Para la dirección “Y”, el modo en el que más masa se transporta es el tercero con un 76,49%. En el caso de los dos modos restantes considerados la masa transportada registra valores de hasta 2,72%.

3.4.2.5 Síntesis de la forma

El empleo del pórtico con vigas en voladizo como unidad estructural que resuelve el proyecto, permite a Mendes da Rocha cumplir la premisa de “planta liberada” del Movimiento Moderno. A su vez esta decisión le permite “encerrar” al interior del núcleo de columnas el área de descanso en su búsqueda del concepto de privacidad.

La sucesión de dos pórticos—que se resuelven en dos niveles—han sido arriostrados mediante nervios en sentido transversal que se prolongan en volado hacia cada lado para resolver parte del programa arquitectónico. La disposición de los nervios obedece a una transmisión uniaxial de las cargas en las que las

líneas de apoyo se encuentran definidos por dos lados que corresponden a las vigas maestras, por lo que de haber sido planteada una retícula ortogonal de cuatro apoyos, hubiese sido necesario además amarrar los pilares “A1” y “A2”, y “B1” y “B2” para una transmisión biaxial de la carga, sin embargo, esta decisión conlleva un aumento en el peso de la losa.

En cada nivel, en el perímetro de la planta se disponen vigas que en algunos casos se extienden a manera de paños de hormigón. La ubicación de los paños de hormigón en planta alta soluciona problemas relacionados a la iluminación, ventilación, recolección de aguas lluvias y relativos al programa. De este modo los paños de hormigón que implican un peso adicional en la cubierta, son también los elementos que mayores desplazamientos relativos presentan de acuerdo al análisis modal. Se intuye que el uso de un par de paños de hormigón también tiene presente el aspecto estructural debido a que, si se hubiese planteado únicamente un paño, la inestabilidad introducida hubiese sido difícil de manejar. Otro aspecto fundamental en la resolución del elemento es que éste no llega a unirse a la losa de entepiso, lo que hubiese supuesto una carga adicional a este elemento que no hubiese permitido el libre movimiento con la que fue pensada, alterando así el comportamiento general de la obra.

A partir de esta condición, resulta lógico que las vigas periféricas tengan un peralte mayor al de los nervios que contribuya a rigidizar estos elementos. Sin embargo, la diferencia de peralte entre estas vigas, se ve influenciada por la decisión de iluminar en menor medida el área del estudio y en mayor medida el área social. He aquí la razón para su diferencia de peralte que ayuda también a estabilizar los paños de hormigón.

En relación a losa de cubierta y entrepiso, la lectura de estos elementos a partir del eje de simetría en “Y”—ubicado entre el eje “1” y “2”—es la siguiente. En el caso de la losa de entrepiso, su disposición asimétrica respecto a este eje, origina esfuerzos mayores a lo largo de la viga transversal y en los nervios hacia el lado del volado más pronunciado y presenta mayores desplazamientos relativos en el análisis modal; mientras que la losa de cubierta se dispone de manera simétrica con respecto a este eje, sin embargo, la línea de claraboyas del acceso, resulta ser beneficiosa porque aligera la losa y por lo tanto los esfuerzos a los que están sujeta la viga maestra “A1-B1” y la cubierta a lo largo del eje de esta viga. De este modo, son evidentes las implicaciones a nivel estructural en el comportamiento de la estructura al haber manejado disposiciones simétricas y asimétricas.

A partir del cálculo de la deriva, se determina que los desplazamientos que aparecen a partir de la carga sísmica no suponen riesgo. Además, en los esfuerzos normales analizados, se advierten esfuerzos puntuales en “sy” por “sjx” y “sy” por “sjy”—en el tragaluz del desayunoador—que superan la resistencia del hormigón de 18,39 MPa, y que se podría manifestar a través de fisuras en la estructura.

Con respecto a la particular forma de los tragaluces horizontales, éstos pueden ser entendidos a partir de los esfuerzos y análisis modal. Mientras más próximo es el elemento al eje de la viga que conforma el pórtico, más vulnerable, condición que se evidencia en el tragaluz del desayunoador cuyos esfuerzos son mayores que aquel ubicado en el área social, así como su desplazamiento relativo.

Es interesante comprender a los paños de hormigón como elementos a partir de los cuales el arquitecto juega con un agente físico como lo es la luz. De este modo, estos elementos se contraponen a sus lados perpendiculares—que apenas filtran luz—, e inversamente, permiten el ingreso limitado de luz, de tal forma que, estos paños no pierdan su cualidad de “muro”. En este contexto debiesen ser entendidas las perforaciones que existen y la ubicación específica de los tragaluces, asociado al programa que se ve condicionado por el área de descanso situada al interior del núcleo.

Expuestos los elementos arquitectónico-estructurales, la forma estructural se puede entender de la siguiente manera:

“Soliloquio”: La simplicidad del cálculo de las fuerzas de una estructura isostática—tal y como fue concebida—sugiere la participación del mismo arquitecto en esta instancia, pero que, conociendo el sistema constructivo a emplearse, pudo jugar con los espesores de las piezas al tratarse de una estructura hiperestática que transfiere las cargas a los diferentes elementos.

A partir de los bocetos del proyecto, es posible afirmar que, el arquitecto ya considera un módulo—correspondiente a la nervadura—y espesores—correspondiente nervios y losas—, que variaron ligeramente respecto a la obra construida. A partir de la disposición de los nervios se fundamenta el empleo de dos únicas vigas maestras que conforman los dos pórticos en volado y que han sido empleados como unidad estructural; además, los diminutos espesores de las losas evitan que aparezcan momentos en las columnas. La tipología empleada permite, además,

aumentar el momento de fuerza en los volados para disminuir el momento de fuerza en la parte central de luz mayor.

3.4.3 Pabellón de Brasil en Osaka

3.4.3.1 Análisis histórico

Brasil en las Exposiciones Universales

La historia de la participación de Brasil en exposiciones universales se remonta a 1862. Sin embargo, tres diseños durante el siglo XX son considerados como clave en la historiografía de la arquitectura brasileña y han sido reconocidos internacionalmente. Estos son los de Nueva York en 1939, Bruselas en 1958 y Osaka en 1970 (Zein & Amaral, 2011).

El Pabellón de Brasil en 1939, fue una oportunidad para los arquitectos de aquel país puedan desarrollar el “espíritu brasileño” dentro de la arquitectura moderna de la época. El jurado y el Ministerio de Trabajo, acordaron que el Arq. Lúcio Costa y el Arq. Oscar Niemeyer elaboraran el diseño del pabellón (Fig.3.130), que incorporaba los pilotis, rampa de acceso y los elementos huecos de la fachada que actúan como quiebrasol característicos de Costa, con la curvatura de paredes acompañando el terreno y jardín en la parte posterior de Niemeyer (Segawa, 1998).

Para exposición internacional de Bruselas en 1958, el pabellón no fue resultado de una competencia y fue encargado al arquitecto Sergio Bernardes quien se caracterizó por la exploración de estructuras de metal y se enmarca en la tradición de los pabellones que utilizaron marcos metálicos como estructura que comenzó con el *Crystal Palace* de Joseph Paxton en 1851 (Nobre, 2011).

En el Pabellón de Brasil en Bruselas se observan

según Nobre (2011) soluciones estructurales audaces asociadas a la exploración de las cualidades plásticas y constructivas y a la resistencia del acero, además destaca la rapidez para su ejecución—alrededor de 100 días.

Cuatro torres metálicas triangulares (Fig.3.131) sostenían un ligero y pequeño dosel bajo el cual se desarrollaba el espacio de exposiciones en función de una rampa. Este dosel se estructura por una red de cables, que consisten en 16 principales en dirección longitudinal cada dos metros, que trabajan con los cables perpendiculares (Nobre, 2011).

Historia Pabellón de Brasil en Osaka

La década de 1960 se caracterizó por ser un período de debilitamiento de las características que dieron forma a la “identidad nacional” brasileña nutrida por intelectuales de la generación de 1930 que incluía al Arq. Lúcio Costa. Brasil no sería excepción del modelo autoritario de gobierno que empezaría a dominar a varios países latinoamericanos, así con el golpe y establecimiento militar la participación de Brasil en el circuito de exposiciones internacionales dejó de ser una prioridad para el estado. Sin embargo, el período de aislamiento—en parte autoaislamiento—luego del surgimiento de Brasilia en 1960 y el año previo a la Exposición en Osaka estimuló a los arquitectos a reafirmar la arquitectura brasileña promoviéndola como representativa y valorándola como manifestación “nacional” (Zein, 2005).

Habían transcurrido doce años desde la última participación de Brasil en exposiciones internacionales en la Expo 58. En 1969 el Ministerio de Relaciones

Exteriores pidió al *Instituto de Arquitectos de Brasil* (IAB), que les sugiriera cinco arquitectos para el diseño del Pabellón de Brasil en Osaka, en un año en el que los arquitectos brasileños de renombre acababan de exiliarse, o estaban siendo oprimidos, no obstante, el presidente del IAB, propuso la organización de un concurso nacional de arquitectura—segundo después del proyecto para la nueva capital Brasilia (Zein & Amaral, 2011). Fueron entregados 83 proyectos en un plazo de 25 días, siendo así la mayor participación en concursos de ámbito nacional hasta ese momento (Editorial Acrópole, 1969).

Para la entrega de propuestas debía considerarse que el área total disponible de 4.000 metros cuadrados, mientras que la superficie destinada a la construcción del pabellón no sería mayor a 1.200 metros cuadrados. El valor total de los premios entregados fue de 16.380,00 cruzeiros y el presupuesto de la obra fue de 600 mil dólares. El pabellón estaría situado en un lugar privilegiado, siendo parte del “Symbol Zone”—una franja de 150 metros de ancho que recorría 1000 metros y dividía la feria en zona norte donde se ubicaban los pabellones internacionales y zona sur donde se ubicaron los pabellones de recreación, administración, y empresas y servicios locales (Fig. 3.132) (Dantas, 2010).

Las propuestas que fueron premiadas compartían con el ganador soluciones enfocadas a una única cubierta bajo la cual se desarrollaban las actividades, como es el caso del segundo lugar (Fig.3.133) que hacía énfasis en el aspecto tecnológico. El mismo partido en relación al uso de la cubierta adoptó el cuarto lugar (Fig.3.134), mientras que la propuesta del tercer premio (Fig.3.135) también muestra un interés en la expresión de la



Figura 3.130. Pabellón de Brasil en Bruselas, 1939

Fuente: Plataforma Arquitectura (2015). Recuperado de: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/773203/la-busqueda-de-la-identidad-en-la-arquitectura-peruana?ad_medium=gallery



Figura 3.132. Plan maestro de Kenzo Tange para la Expo 70

Fuente: Braga, J. B. (2010), pp. 164. Recuperado de: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-09062010-102456/publico/DISSERTACAO_juliana_braga.pdf

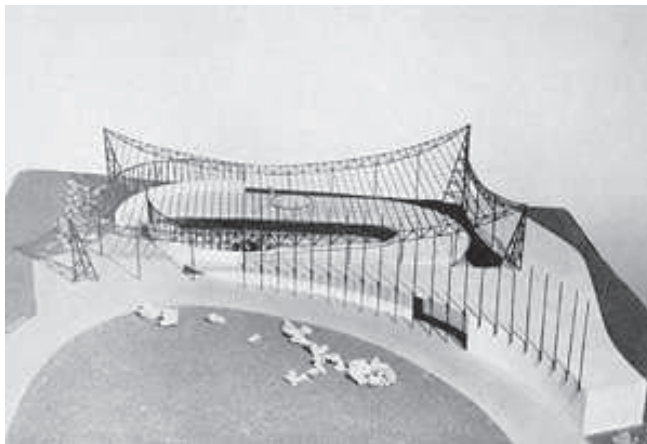
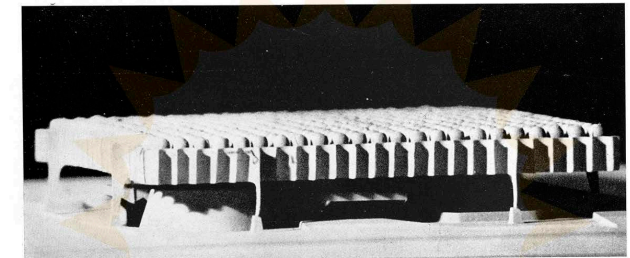


Figura 3.131. Maqueta del Pabellón de Brasil en Bruselas, 1958

Fuente: Dantas, A. D. (2010), pp. 164. Recuperado de: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-15062010-102841/publico/Tese_final.pdf

Pavilhão de Osaka 2.º prêmio



projeto: Kaiti Yamaguchi, Luigi Villavechia,
Rogério A. Dorsa Garcia e Walter
Caprera, arquitetos

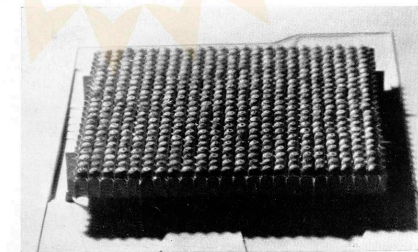


Figura 3.133. Segundo premio del concurso para el Pabellón de Brasil para la Expo 70

Fuente: Acrópole (1969), pp. 18. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/361>

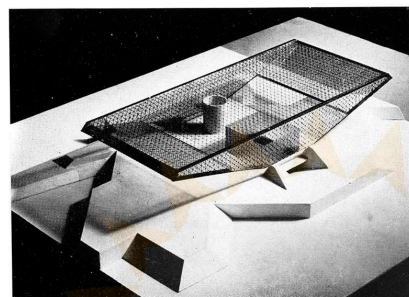
tecnología en la concepción estructural (Costa, 2010).

El diseño ganador para la Exposición Japonesa Universal de Osaka (Expo' 70) fue el de los arquitectos paulistas: Paulo Mendes da Rocha, Jorge Caron, Júlio Katinsky y Ruy Ohtake junto con un extenso grupo de arquitectos asistentes, estudiantes y artistas visuales. En relación al cálculo estructural, éste fue concebido por el ingeniero Siguer Mitsutani—docente de la Escuela Politécnica de São Paulo—, y desarrollado por Katsuhiko Sato, mientras el proyecto ejecutivo fue elaborado en Japón bajo la supervisión de Mendes da Rocha y Mitsutani. La empresa a cargo de la construcción fue *Fujita General Construction Co.* (Dantas, 2010).

Al momento de la competición, se advierte ya el trabajo conjunto entre Mendes da Rocha y Mitsutani, que una de las láminas de presentación confirma al expresar que: “El dimensionamiento de los elementos de hormigón armado y pretensado fue calculado” (Amaral, 2010). Para este precálculo, según Mendes da Rocha (2017), se incluyeron tablas especiales que consideraban los temblores que Osaka sufría—promedio siete temblores diarios. En el caso de las vigas sinuosas (Fig.3.136) características del proyecto, Mendes da Rocha agrega además que, éstas fueron concebidas de manera que sean “buenas para que fluyan las cargas” (Fig.3.136).

La decisión del jurado—que fue de conocimiento público—expresaba que la propuesta de Mendes da Rocha coincidía con la postura de Brasil de “no competir con los países superdesarrollados”, pasando así a un segundo plano los aspectos tecnológicos como criterio principal de elección de la propuesta. El jurado observó en el diseño “poéticas inconfundibles,

Pavilhão de Osaka 4.º prêmio



projeto: Ivan Mizoguchi e Rogério Malinski
arquitectos

Expressão plástica

Pensamos o problema da expressão plástica em termos de meio de comunicação, e este, como possibilidade da participação do observador individual ou coletivo.

É uma tentativa de integração do indivíduo com os seus semelhantes na convivência pessoal do ambiente da feira e na vivência perspectiva e emocional no espaço interno do pavilhão. Assim, criou-se uma praça, elevada, parcialmente coberta, que ocupa todo o terreno.

É o espaço que propicia o encontro e convida ao diálogo. O pavilhão é a tentativa de criar, de propor um novo símbolo, é a forma típica do estágio de uma cultura, é a simplicidade, a castidade, os anseios e possibilidades do homem fundidos no aço e no concreto armado. Sua transparência dá ao espaço um novo valor: não há barreiras, o homem pode ver o céu do seu abrigo.

Funcionalidade

Considerando as pequenas dimensões do lote destinado ao Pavilhão do Brasil,

a sua situação entre duas vias de trânsito e desconhecimento quanto as características dos pavilhões vizinhos, procuramos isolar o bloco dos limites do terreno, permitindo ao público o livre trânsito sobre a praça e garantindo ao bloco o seu necessário isolamento em relação aos outros pavilhões.

Isto pôde, preocupar-se a organização dos espaços da Pavilhão, sendo definidos três setores:

1. Acesso principal e secundário, exposição e anfiteatro.
2. Local para recreação, administração, serviços etc. Estes foram localizados no pavimento térreo ou sob o piso da praça.
3. Exposição e saída no pavimento superior.

Técnica de construção

Considerando a tecnologia do Japão, as condicionantes quanto à necessidade de desmontabilidade e ainda o caráter de Pavilhão de Feira propomos um bloco construído de treliça espacial, metálica, de tubos de aço sem costura, sustentado por quatro apoios de concreto.

O esquema estrutural é simples, pois os dois planos laterais do bloco que estão apoiados funcionam como vigas e recebem a carga da Pavilhão. O piso interno do bloco é suspenso na cobertura.

Colaboradores: C. Mann, D. Becker, E. Lima, I. Carvalho, J. Perp, M. Malinski, N. Mochida, P. Glara, P. Guimarães, R. Gutierrez, F. J. consultores: E. Fritsch, J. P. de Oliveira e F. C. de Souza.

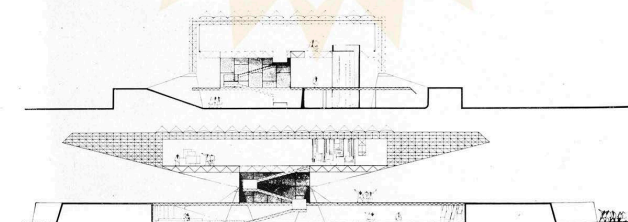
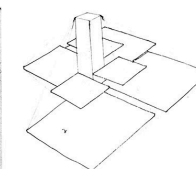
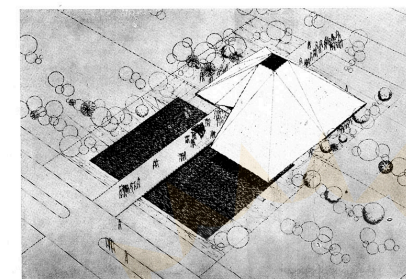


Figura 3.134. Cuarto premio del concurso para el Pabellón de Brasil para la Expo 70

Fuente: Acrópolis (1969), pp. 26. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/361>

Pavilhão de Osaka 3.º prêmio



em sequência lógica, descendo de patamar em patamar, através de escada simples, já que o desnível é de 1,5 m somente.

A localização das escadas e a forma quadrada dos patamares permitem o máximo aproveitamento do espaço através da definição do percurso das pessoas segundo um círculo. Por outro lado, permitem ainda o uso do patamar para filmes, teatros, desfiles de modas, etc., sem interferir com a circulação, a qual, neste caso, segue o menor percurso possível. A saída do espaço de exposições é feita separadamente da entrada. Visto que os dados do concurso não esclarecem qual o uso que deve servir de acesso, previu-se a possibilidade do uso de ambos ou uma só, indistintamente. O acesso do setor administrativo é feito pelo elevador ou por meio de escada.

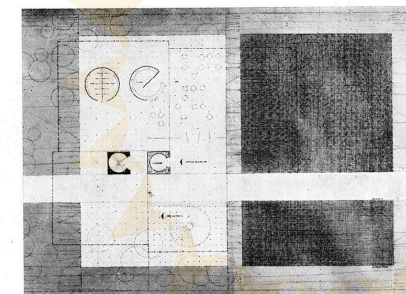
Estruturas e materiais

A estrutura consiste em um pilar central, de concreto armado, e os patamares, suspensos do mesmo. A estrutura elástica é metálica, em forma de treliça especial tubular. Cada patamar será fixado num lado do pilar central com dois ou três apoios articulados e na outra extremidade fixado e suspenso em cabos de aço.

Os patamares serão revestidos na parte superior com material leve e resistente (chapa de aço corrugado com enchimento de concreto espumoso e acabamento em plástico). Entre os cabos de aço será estendida e fixada uma tela composta do mesmo material, de bitola mais fina, para receber a cobertura em plástico liso, flexível e translúcido.

O enriquecimento da cobertura será obtido por meio de cabos de amarração em forma de lique entre a parte central de cada plano de cobertura e o pilar.

Consultor estrutural: Taro, Castella S.A.; colaboradores: T. Lucinski, L. Costa, A. Silva, A. Cassillo, L. Oba e J. M. Kallier



Pavimento térreo

Corte B

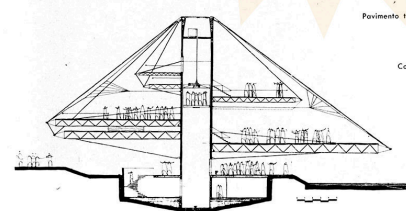


Figura 3.135. Tercer premio del concurso para el Pabellón de Brasil para la Expo 70

Fuente: Acrópolis (1969), pp. 26. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/361>



íntimamente ligadas a las tradiciones brasileñas”, en la que se adopta la planta libre, dando como resultado un “un espacio rico en forma y contenido” (Fig.3.137) (Editorial Acrópole, 1969). El pilar dispuesto en cruz griega, cuyos planos se intersecan y le se les practica un recorte de media circunferencia—pensado como lugar de encuentro—tiene un contenido simbólico y urbano, y su forma se definió tras estudios de pilares realizados por el equipo de trabajo (Fig.3.138) (Costa, 2010).

De esta manera la obra tuvo un enfoque urbano, en el que según el arquitecto brasileño Guilherme Wisnik (2008), “se trata de recomponer metafóricamente la ciudad dentro de sus lotes, estableciendo relaciones con su entorno que refuerzan su sentido urbano”. En una entrevista brindada a los arquitectos Cecilia Obiol y Sergio Marques en el año 2011, el arquitecto denota la importancia de su idea de “mixtura de la visión de América como un paraíso en la tierra, con un terreno que se sacude siete veces al día” a partir de la cual desarrolló el proyecto. Así, Mendes da Rocha expresaría: “decidí mostrar que la construcción se ampara primordialmente en el territorio. E imaginé ese pabellón que sería fundamentalmente un techo, que es el mejor símbolo de lo construido” (Mendes da Rocha, 2011. p.3).

El proyecto contemplaba además una propuesta preliminar de exhibición y de programa de actividades culturales diseñadas por Flávio Motta, y que se organizaban de la siguiente manera: 1) Historia y Proyecto. 2) Industria — Historia y Proyecto. 3) Espectáculos, con actividades.

El borrador de la propuesta definitiva del programa

fue escrito por el mismo Flávio Motta, y mantenía algunos ejes de la expresada en el proyecto vencedor. Esta propuesta fue presentada al gobierno brasileño e incluía un programa de actividades, así como el contenido de los paneles expositivos (Fig.3.139). La versión definitiva la elaboró el equipo con el tema “Proyecto de la ciudad”, que consta de dos partes: 1) “la visión en Brasil del desarrollo a partir de la ciudad moderna” y 2) “la convivencia en el trabajo: económico-social/científico/artístico”.

Según la Arq. Juliana Braga Costa (2010), el pabellón había nacido con la idea de ligar un diálogo entre la obra arquitectónica y su contenido—discurso sobre la arquitectura y Brasil. Este discurso mostraba independencia del espacio propuesto, de manera que la exposición mostraba autonomía respecto al proyecto arquitectónico. Sin embargo, esta propuesta fue rechazada por el Ministerio de Relaciones Exteriores, quién contrató una empresa que finalmente realizaría la exposición. Para Mendes da Rocha esta decisión del gobierno mostraba un interés en “reafirmar ciertos estereotipos del país, que no comprometían una imagen de desarrollo y crecimiento económico, aliados a una convivencia pacífica de la población compuesta por inmigrantes de todas las razas”, según lo descrito por el catálogo de la exposición realizada (Costa, 2010).

De acuerdo al arquitecto brasileño José Paulo Gouvêa (2018), la construcción del pabellón empezó el 1 de julio de 1969, y fue completado para finales de febrero de 1970, comprendiendo finalmente un área construida de 1.600 m². Se situó entre los pabellones de Checoslovaquia y Etiopía, y fue pensado de manera que conecte a los retiros frontales, en los que se habían configurado la “Plaza de la Amistad” y el “Parque

Grande” (Fig.3.140).

Gouvêa comenta además que la estructura de la cubierta pudo ser construida sin cambios en su diseño gracias a que el ingeniero Mitsutani por pedido de Mendes da Rocha intercedió ante la empresa constructora, la cual pretendía alterar la forma con la que fue concebida para facilitar su construcción.

La elaboración del plan general de la Expo’ 70 estuvo a cargo del arquitecto japonés Kenzo Tange en colaboración de doce arquitectos locales. Este equipo organizó el área de exposiciones basada en el concepto de “tronco de servicios” que establecía jerarquías de uso a partir de una estructura en forma de árbol. (Fig.3.132) El “tronco” concentró las principales funciones técnicas y simbólicas de la feria y serviría como acceso principal a la feria. A partir de esta estructura, se conectan las “ramas” que sirvieron como estructuras de transporte de peatones que los conducían hacia los pabellones (Costa, 2010).

La Expo’ 70 se realizó entre el 14 de marzo y el 13 de septiembre de 1970, y se desarrolló bajo las normas de la *Bureau Internacional des Expositions* (Oficina Internacional de Exposiciones) como había ocurrido en la Expo 58 de Bruselas y la Expo 67 de Montreal. El tema de la exposición fue: *El Progreso y la Armonía de la Humanidad*. Se llevó a cabo en Senri Hills—a las afueras de Osaka—, sobre una superficie de 339 hectáreas y contó con la presencia de 77 países y 64 millones de visitantes. En total se construyeron 32 pabellones japoneses y 84 extranjeros y por primera vez las grandes empresas igualaron en dimensión y espectáculo los pabellones de los países participantes (Dantas, 2010).

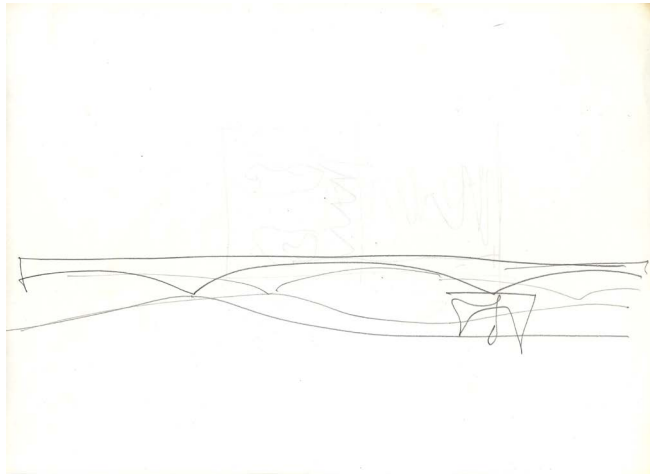


Figura 3.136. Boceto del Pabellón de Brasil en Osaka

Fuente: Paulo Mendes da Rocha (s.f.). Cortesía de: Archivo oficina PMR

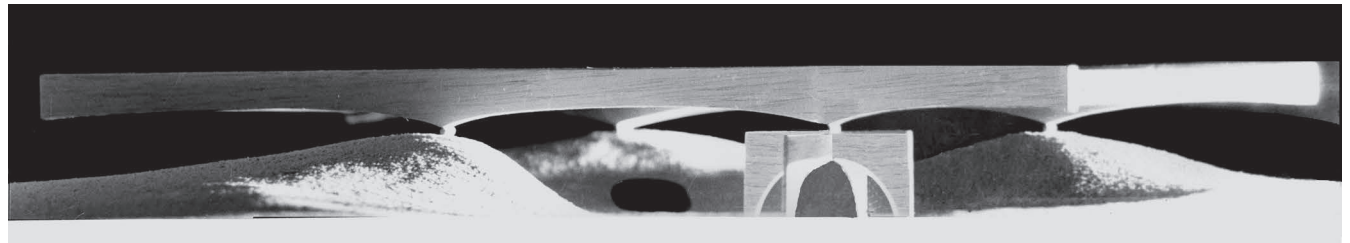


Figura 3.137. Maqueta final para el concurso del Pabellón de Brasil en Osaka

Fuente: Paulo Mendes da Rocha (s.f.). Cortesía de: Archivo oficina PMR

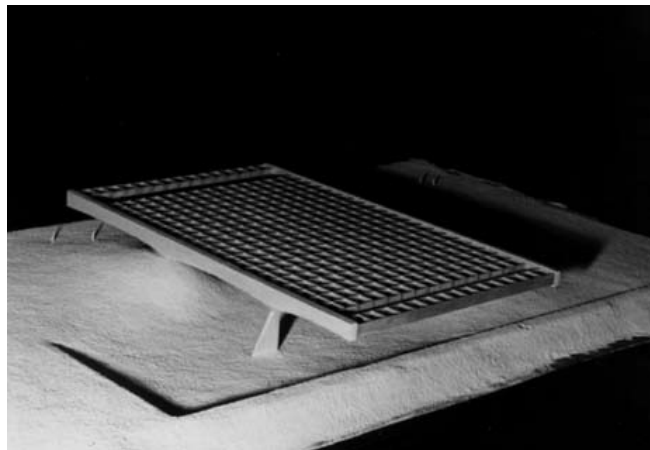


Figura 3.138. Estudio de pilar del Pabellón de Brasil en Osaka en torno a la Plaza del Café

Fuente: Braga, J. B. (2010), pp. 153. Recuperado de: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-09062010-102456/publico/DISSERTACAO_juliana_braga.pdf

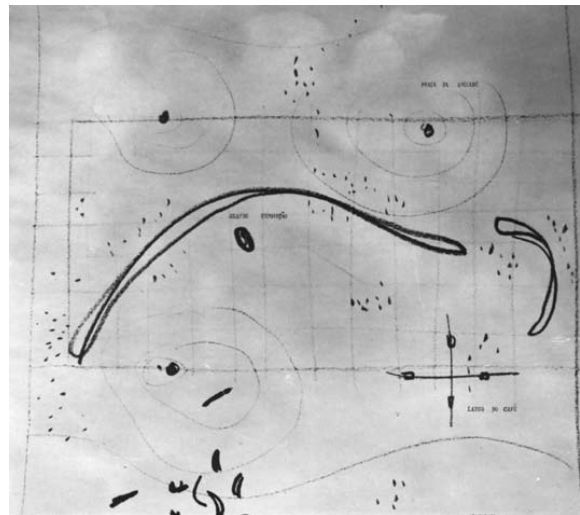


Figura 3.139. Estudio para exposición compuesta por paneles continuos y esculturas sueltas

Fuente: Braga, J. B. (2010), pp. 175. Recuperado de: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-09062010-102456/publico/DISSERTACAO_juliana_braga.pdf

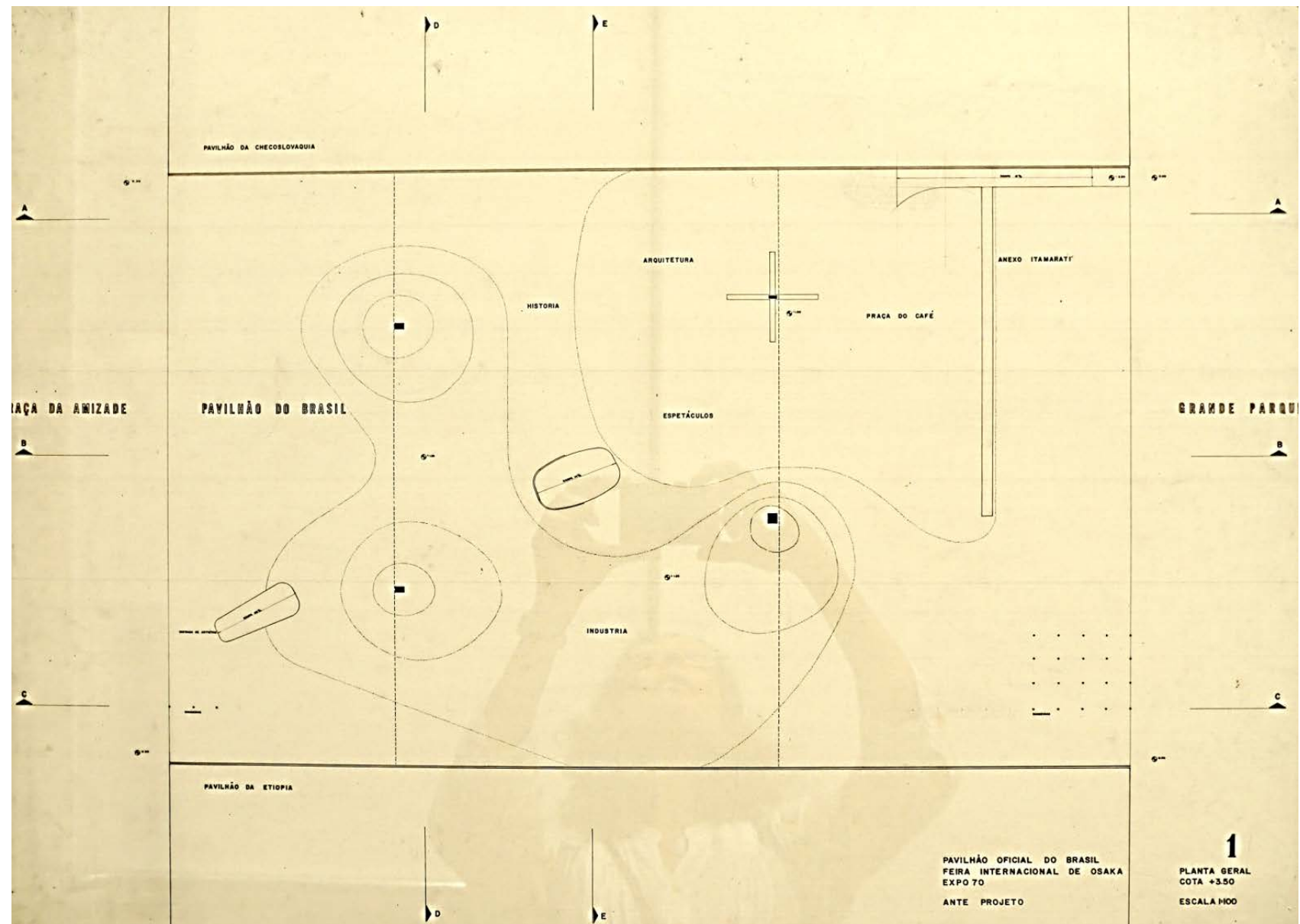


Figura 3.140. Anteproyecto del Programa del Pabellón de Brasil en Osaka en la cota 3,50m, ubicado entre Plaza de la Amistad y el Parque Grande

Fuente: Exposição *Arquitetura de Exceção – o Pavilhão do Brasil na Expo'70 Osaka*. Cortesía de: Arq. Anália Maria Marinho de Carvalho Amorim

Aunque el pabellón de Brasil fue concebido como una construcción temporal, una universidad local pretendía mantenerla como escuela de danza local para niños. Finalmente, esto no ocurrió ante la negativa del gobierno militar brasileño, que ordenó derribarlo (Wainwright, 2017).

3.4.3.2 Análisis arquitectónico

Siendo los principales antecedentes de arquitectura de exposiciones los pabellones de exposiciones de Nueva York y Bruselas, en relación al Pabellón de Brasil en Osaka se deduce que:

En el caso del primero, Mendes da Rocha adopta las formas curvas que antes eran meramente formales y las incorpora a los principales elementos estructurales de perfil mixtilíneo cuya construcción fue posible por la tecnología utilizada.

De la Expo 58, adopta la idea planta libre—alineándose también con la visión de Tange de “conexión”—que prescinde de elementos estructurales hacia el interior del proyecto. De esta obra, aprehende también del arquitecto la exploración del material a nivel tecnológico que lo lleva al límite, para que de este modo sea posible materializar las decisiones arquitectónicas. Adopta además del pabellón de Bruselas, la idea apoyos puntuales para sostener la cubierta, sin embargo, según la arquitecta Izabel Amaral (2010), se distancia de la cubierta de este proyecto al “evitar la apariencia de ligereza”.

En el caso de ambos, la pendiente presente en las rampas, es reinterpretada y puesta en escena como rasgo característico del proyecto, que, al haber sido

manipulado el terreno, permite disimular tres de los cuatro soportes verticales. La configuración del terreno, disimula varios de los soportes, así como la posición asimétrica de los mismos dificulta la vinculación de esta edificación con tipología alguna, más allá que la disposición de la estructura por su ubicación periférica se aproxima a un peristilo (Fig.3.141). Sus cuatro soportes se organizan a partir de un tramo libre de 30 metros, con voladizos que superan los 20 metros en los extremos, en lo que considera la arquitecta brasileña Dias Dantas (2010) como un proyecto “audaz” por sus grandes luces.

La exposición de Brasil ocupó un terreno de 50 x 80 metros. La cubierta del pabellón, mientras tanto se desarrolló en un área de 32,4 x 49,6 metros, ocupando todo el ancho del terreno.

Según el arquitecto brasileño José Paulo Gouvêa (2018), el haber ocupado la cubierta de la FAU USP (Fig.3.142)—institución donde los profesores de izquierda dictaban clases y se les había sido prohibido de ejercer la profesión en la dictadura—, se asocia a una toma de postura política.

El interés del arquitecto por la cubierta se debe principalmente a su especial forma de iluminar de manera uniforme “que transmite la sensación de algo que se ha roto y se ha recolocado en trozos” (Mendes da Rocha, 2011). Así, esta cubierta de casetones troncopiramidales y paneles de vidrio—cuyos tragaluces se originan a partir de la intersección de vigas en ambos sentidos—, se ajusta a las dos vigas sinuosas paralelas cuyas formas recuerdan los arcos abatidos utilizados en puentes (Fig.3.143). Visto desde abajo, no se advierte la existencia de distintas tipologías de vigas—

profundizadas en el siguiente análisis—, esto debido a que se optó por el uso de un único tipo de casetón para lograr uniformidad, en una decisión de orden visual y estético por parte del arquitecto (Fig.3.144).

Esta rejilla de casetones no ocupa la totalidad del marco formado por las cuatro vigas perimetrales. En cada uno de los extremos se interrumpe la cuadrícula para dejar pasar luz. Para ello han sido colocado entre la viga de borde transversal y la subsiguiente—en cada extremo—vidrio que ha sido modulado a partir de las vigas intermedias en sentido longitudinal (Fig.3.145 y Fig.3.146), y que se adapta a la pendiente de los casetones de manera que sirva para la recolección de aguas lluvias.

A través del carácter de “plaza abierta”, el pabellón—que no poseía puertas ni barreras físicas—buscaba la interacción entre los asistentes, al mismo tiempo que se relacionaba con los pabellones vecinos. Para que el pabellón adquiriera este carácter, todo el espacio interior del edificio fue ubicado en el subsuelo. La condición de “apertura” generada, es la más evidente y predominante característica del proyecto, que sitúa al “hombre sobre la técnica”, idea que ha sido parte del pensamiento de Mendes da Rocha.

Desde la calle principal, las elevaciones artificiales propuestas no permitían ver hacia el interior la zona de exhibiciones y el anexo del Ministerio de Relaciones Exteriores conocido como Itamaraty. Para acceder a la zona de exhibiciones primero se desciende por una rampa que atraviesa un área del subsuelo—situado a menos 3 metros. En esta área del subsuelo de 13,4 x 49,6 metros, las columnas circulares han servido para zonificar el espacio y puede interpretarse que su sección

obedece a la fluidez espacial que persigue el arquitecto. La parte central comprendida entre la columna “P1” y la columna “P2”, se utilizó para espectáculos particulares y como una sala, así como ser parte de la circulación que atraviesa este nivel inferior y que al subir por unas escaleras desembocaba en la mitad del área de exhibiciones. Entre la columna “P2” y el muro de contención, mientras tanto, se ubicaban una sala de artistas y un depósito/oficina. Al otro extremo, entre la columna “P1” y el muro de contención se situaban los baños públicos (Fig.3.147 y Fig.3.148).

El segundo bloque—situado en la cota -1,2 metros y a 40 metros del bloque anterior—no tiene comunicación con el otro bloque y su estructura es independiente de la cubierta del pabellón. Estaba destinado a oficinas diplomáticas (Fig.3.148) y era de acceso restringido, al cual se accedía descendiendo desde el interior del predio por una rampa de menor sección. Este bloque estaba ubicado al lado opuesto del primer bloque y se encontraba alineado a aquel lado de la cubierta limitando con el “Parque Grande”. Las dimensiones de este bloque rectangular fueron de 30 x 12,5 metros y se iluminaba a través de un lucernario que se extendía en sentido longitudinal de este bloque, y estaba diseñado en pendiente para evitar una vista abierta de los espacios subterráneos (Zein & Amaral, 2011).

El terreno estaba cubierto por una cama de asfalto que conformaba “dunas artificiales”—en la que se ocultaban tres soportes (Fig.3.149)—que se elevaban hasta el encuentro de los puntos de apoyo con la cubierta. Esta solución estaba cargada de simbolismo, con respecto a la cual Mendes da Rocha en su proyecto ganador consideraba que “el piso tendrá ondulaciones suaves como los caminos de una ciudad, donde el paseo y el

encuentro se dan naturalmente” (Editorial Acrópole, 1969).

Así, el pabellón en esta cota, se caracteriza por la fluidez espacial alcanzada al liberar la planta mediante la manipulación del terreno y la disposición asimétrica de la estructura, evitando cualquier tipo de referencia que fragmentase el espacio. El cuarto elemento de apoyo, corresponde a un soporte de dos arcos cruzados como único elemento arquitectónico vertical visible (“P4”), en torno al cual se genera la “Plaza del Café”, y que por su forma no se corresponde con el arquetipo de columna (Fig.3.150).

Según Zein & Amaral (2011) este simbólico pilar encuentra su referencia en el arco y bóveda, reconocidos símbolos arquitectónicos desde la antigüedad, usados para destacar este espacio. Para las arquitectas Zein & Amaral (2011), la “Plaza del Café” forma una especie de anfiteatro gracias a las colinas artificiales formadas, este lugar en parte recibía la sombra proyectada por la cubierta y en parte estaba abierto. Este particular pilar incorpora a su diseño las formas orgánicas presentes en el diseño de las vigas de borde de la cubierta y en la topografía artificial del terreno, para permitir el libre tránsito a través del pabellón. En relación a este elemento, Zein & Amaral (2011) sugieren que el único pilar visible “paga tributo a los arcos coloniales y a las columnas de los palacios aporticados de Brasilia”. Amaral (2010) en su tesis doctoral, observa además cómo este espacio pensado originalmente como “espacio de encuentro”, finalmente fue ocupado por paneles de exhibición como parte de la exposición.

Debido a la escasa información en relación a las exposiciones realizadas por encargo del Itamaraty,

resulta imposible analizar las mismas, que, aunque no se establecieron como elementos arquitectónicos en el espacio, hubiesen permitido un mejor entendimiento de la exposición desarrollada, adaptada a la estructura que permitió la aplicación del concepto arquitectónico de “planta libre” en esta obra de Mendes da Rocha.

3.4.3.3 Análisis sistema estructural

A continuación, se analiza la estructura correspondiente a soportes y cubierta del pabellón. Este último elemento, define el espacio y caracteriza a la obra por sobre los demás espacios proyectados. El volumen y calidad de información encontrado es principalmente en relación a este elemento, para así poder efectuar una lectura correspondiente al sistema estructural. La información correspondiente a la estructura de los bloques subterráneos es escasa como para poder ser analizados. En el caso del bloque subterráneo—bajo la cubierta de pabellón—apenas se tiene conocimiento del uso de hormigón prefabricado en la estructura de su cubierta y las dimensiones proporcionadas a partir de un único corte (Fig.3.151).

El Pabellón de Brasil fue una de las pocas edificaciones construidas en su totalidad en hormigón armado y hormigón pretensado dentro de la Expo’70. Gouvêa (comunicación personal, 22 de mayo de 2019) indica que una de las particularidades del proyecto reside en el sistema constructivo utilizado para la cubierta. Se trata de un sistema postensado bidireccional fundido in situ, que supuso además un “desafío” para la empresa constructora.

El proyecto estructural del pabellón utiliza diferentes módulos estructurales correspondientes a elementos

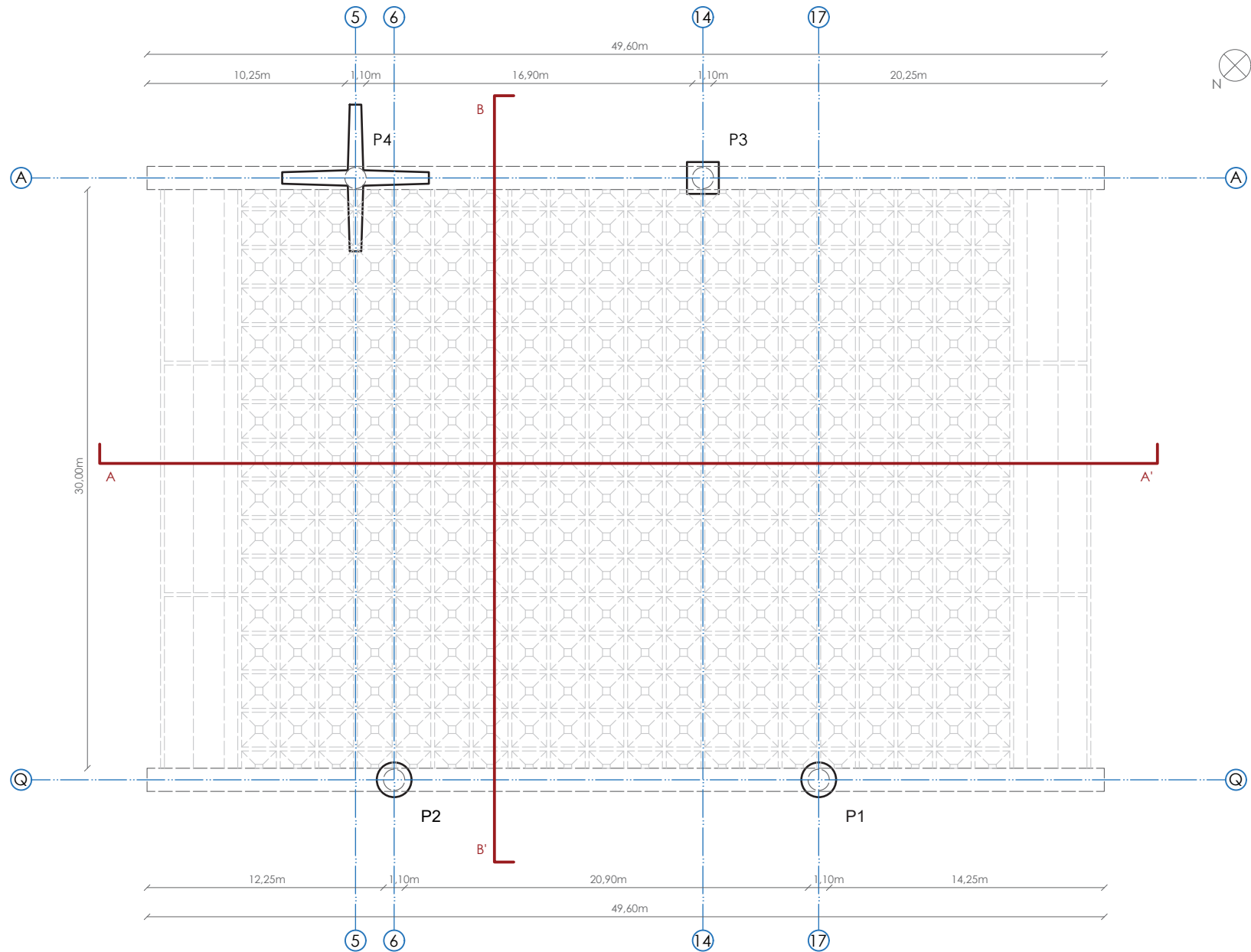


Figura 3.141. Disposición de los soportes en planta baja del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc.1:300

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*



Figura 3.142. Interior de la FAU USP

Fuente: Atlas of Places (2018). Recuperado de: <https://www.atlasofplaces.com/architecture/fau-usp/3>



Figura 3.143. Puente de Neuilly de Jean-Rodolphe Perronet, 1767–1774

Fuente: Se connaître - De l'inspection à la culture (2012). Recuperado de: <http://mieux-se-connaître.com/2012/02/ponts-suite-pont-de-neuilly/>

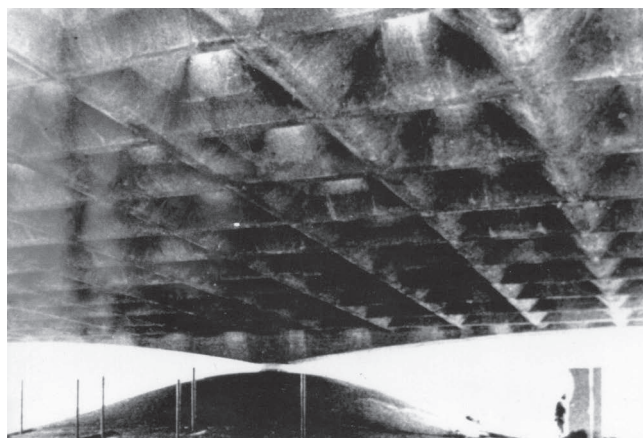


Figura 3.144. Vista interior de la cubierta del Pabellón de Brasil en Osaka

Fuente: Anónimo (s.f.). Cortesía: Archivo oficina PMR

como soportes, vigas en forma de “flecha con punta hacia abajo” y vigas sinuosas longitudinales, que se aprecian en plantas estructurales en distintos niveles (Fig.3.152 y Fig.3.153).

Los soportes—sobre los que asienta la cubierta—, están alineados en pares, y la distancia entre sus ejes es de 31,2 metros (Fig.3.152). De acuerdo a su ubicación, se establece que, en relación al eje transversal central, se disponen asimétricamente. Existe un desfase de dos metros entre el pilar “P4” y la columna “P2”, mientras que el pilar “P3” se encuentra desfasado 6 metros con respecto al columna “P1”. Fotografías del pabellón permiten observar marcas rectangulares en las vigas principales correspondientes a las vigas transversales donde se efectuó el postensado (Fig.3.154).

Estructuralmente la cubierta se resuelve con dos vigas longitudinales (módulos estructurales) de hormigón pretensado de canto variable: 2,5 metros en los extremos y alcanza los 3 metros en su línea inferior de cada arco, para dar paso a una sección donde se utilizaron juntas flexibles de neopreno—similar al ocupado en puentes y viaductos japoneses—para transferir el peso de las vigas de manera puntual a los soportes. Estas vigas oscilan entre la cota +4,50 y +7.50 metros (Fig.3.155).

A estos elementos se amarra una rejilla de casetones compuesta de vigas transversales y longitudinales en forma de “flecha que apunta hacia abajo” de 1,80 metros de altura (módulo estructural). En sentido longitudinal se ubicaron cada 2 metros con respecto a su eje, aunque la separación al final de cada extremo aumenta a 4 metros entre ejes, y estas vigas perimetrales (módulo estructural) han sufrido la extensión de una de

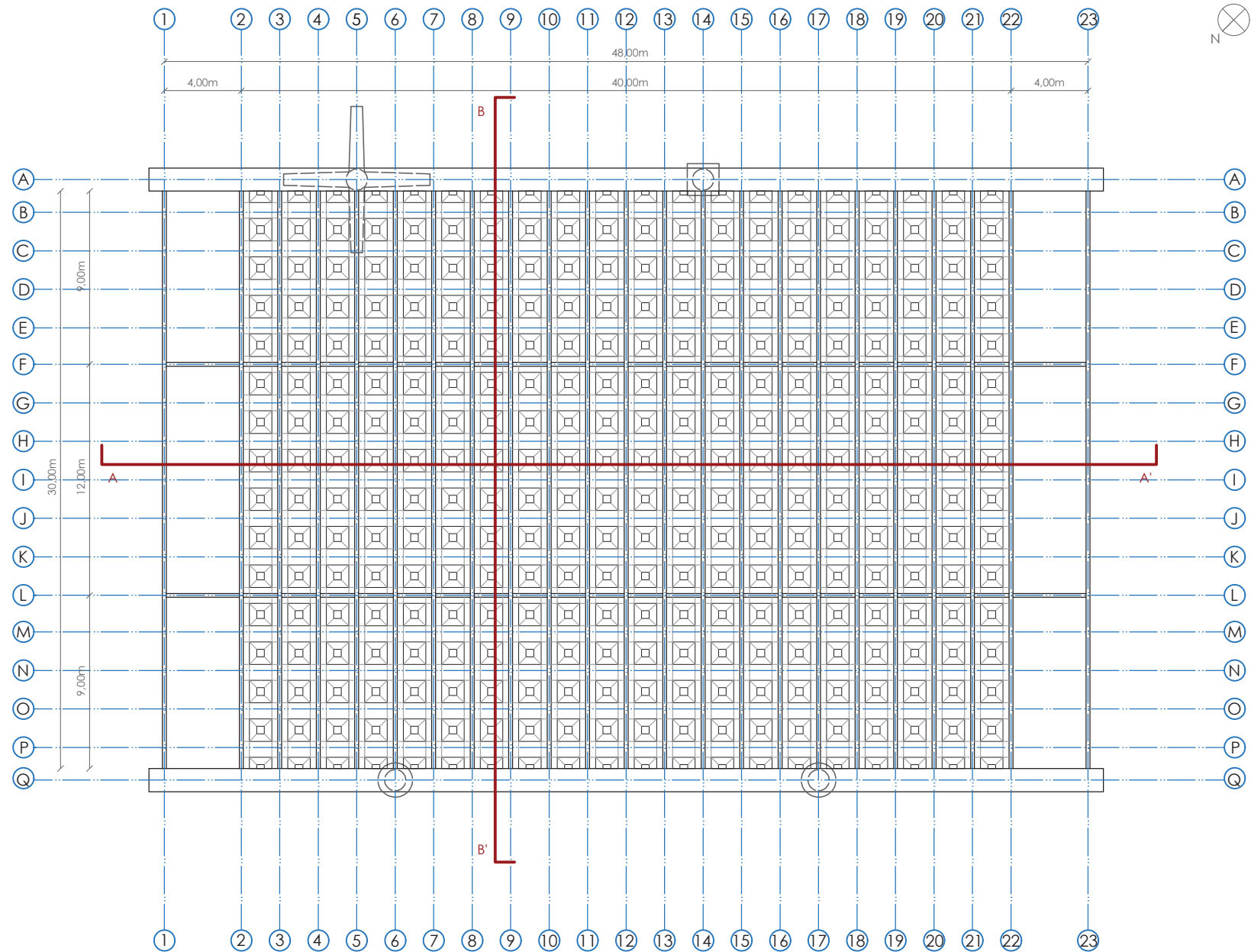


Figura 3.145. Planta de cubiertas del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc. 1:300

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*





Figura 3.146. Tragaluz de la cubierta entre viga perimetral transversal y sub-siguiente

Fuente: Archdaily (2014). Recuperado de: https://www.archdaily.com.br/624060/classicos-da-arquitetura-pavilhao-do-brasil-em-osaka-paulo-mendes-da-rocha-e-equipe?ad_medium=gallery

sus aletas (Fig.3.155). En sentido transversal, mientras tanto, se ubicaron cada 9,60 metros con respecto al eje de las vigas longitudinales; y poseen las mismas características de las aquellas vigas colocadas cada dos metros en el otro sentido. Entre estas vigas se utilizó un nuevo módulo estructural, correspondiente a una viga en "v", cada dos metros respecto a su eje (Fig.3.156).

Según Amaral (2010), este último tipo de vigas cumple la función de rigidizar las vigas longitudinales. De este modo queda configurada esta "malla de vigas" de 49,60 x 30 metros se ubica en la cota +7,10 metros. Se ha considerado como otro modulo estructural, el tramo perteneciente a las vigas "F" y "L", entre los ejes 1 y 2, y 22 y 23, donde su sección cambia de forma, transformándose en un rectángulo de 0,2 x 1,8 metros.

Los soportes utilizados son independientes a nivel constructivo y estructural de la losa de cubierta. Éstos fueron construidos en hormigón armado fundido en sitio. Las columnas "P1" y "P2", descienden hasta el nivel -3,04 metros, alcanzando una altura de 6,86 metros (Fig.3.156). Tomando como referencia fotografías y un corte, se deduce que el pilar "P3" pudo haber llegado a tener el mismo desarrollo de las columnas antes mencionadas.

Entre los soportes ocultos, aquellos de forma cilíndrica (módulo estructural), tienen un diámetro de 1,8 metros y se encuentran ubicados a una distancia de 22 metros entre ejes. Mientras que en el eje "A", se sitúa un nuevo módulo estructural correspondiente a un pilar de sección cuadrada de 1,65 metros y ubicado a 18 metros del único pilar visible—conformado por dos arcos que se cruzan perpendicularmente—, y que divide la carga

en cuatro (Zein & Amaral, 2011). Mayol Amengual (2014), observa en la geometría de este pilar (módulo estructural) una respuesta a las exigencias sísmicas de la zona, de manera que, pudiese simultáneamente absorber movimientos horizontales y descargar el peso de la losa. Se trata de un pilar con cuatro puntos de apoyo en el que cada uno de sus lados tienen una longitud de 3,40 metros, y cuya sección aumenta hacia su interior de 60 a 80 centímetros (Fig.3.157), y cuya altura es de 4,45 metros y se encuentran enterrados 15 centímetros (Fig.3.158).

Posibles movimientos sísmicos—debido a la ubicación del proyecto—debían ser contrarrestados. Así, según Macadar (2005), los puntos de contacto—entre la losa rígida y los soportes—debían permitir la libre dilatación para evitar daños por rigidez, y para ello se previeron cuidadosamente articulaciones especiales del tipo "aparatos de apoyo metálicos elastómeros", de acuerdo a la *Norma de diseño sísmico para estructuras de ingeniería civil* (1965) de Japón. Para entender el uso de este apoyo, se considera como referencia el *MUBE*, que proyectó el arquitecto años después. Aquí el tamaño de los soportes es, según Mendes da Rocha, exagerado para introducir un gato hidráulico que permita elevar las vigas y retirar el elastómero de apoyo (García del Monte, 2006).

El Pabellón de Brasil en Osaka no se desarrolla de manera continua ni constructiva ni estructuralmente, si se consideran sus dos elementos principales: cubierta y soportes. De esta manera, el uso del elastómero, permitió que estos elementos independientes se articulen, para una transmisión puntual de cargas. El uso de este apoyo en la resolución general de la obra, como "articulación de las partes" define a la obra como

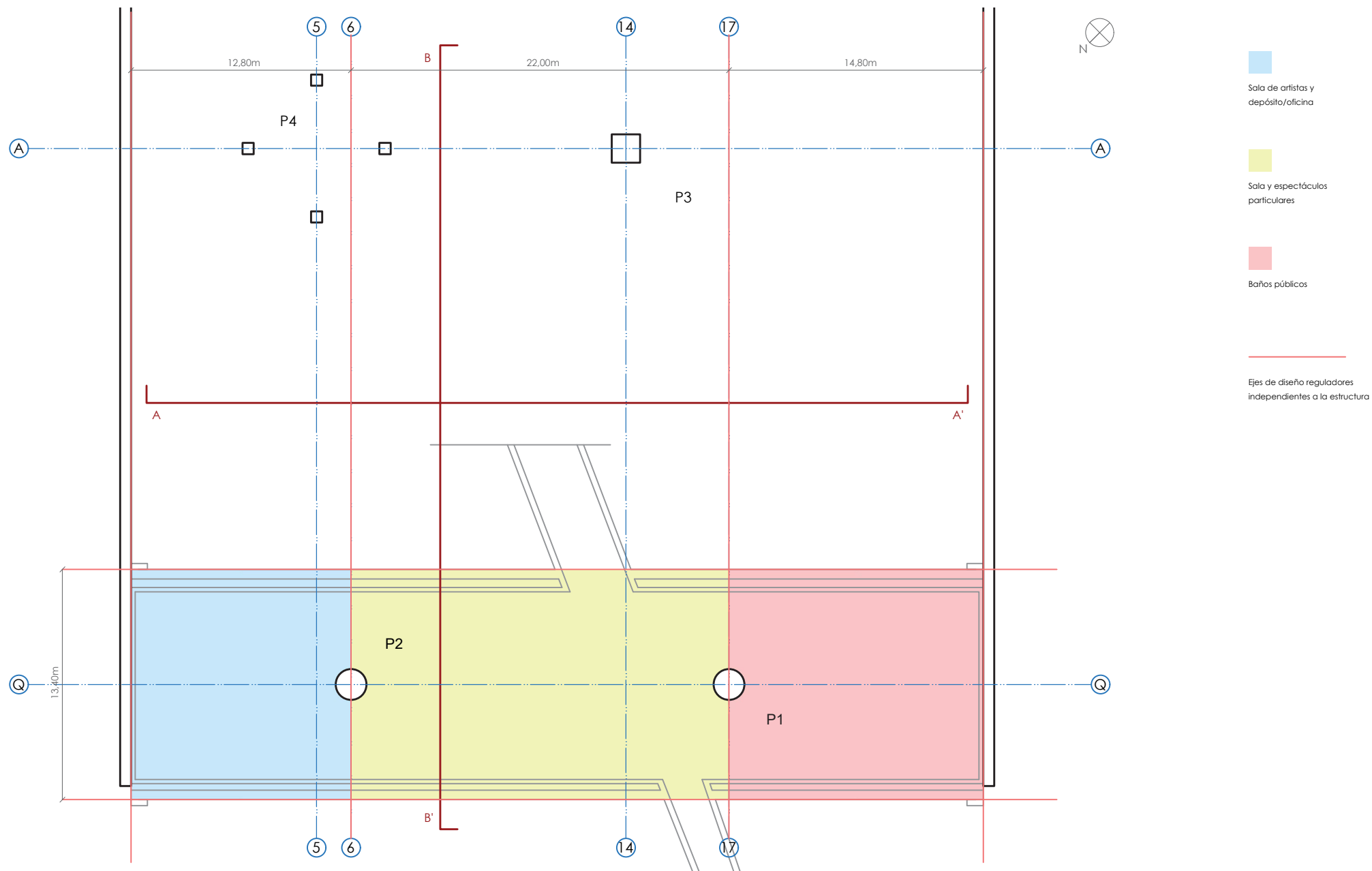


Figura 3.147. Zonificación del primer bloque subterráneo en función de la estructura del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc.1:300

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*

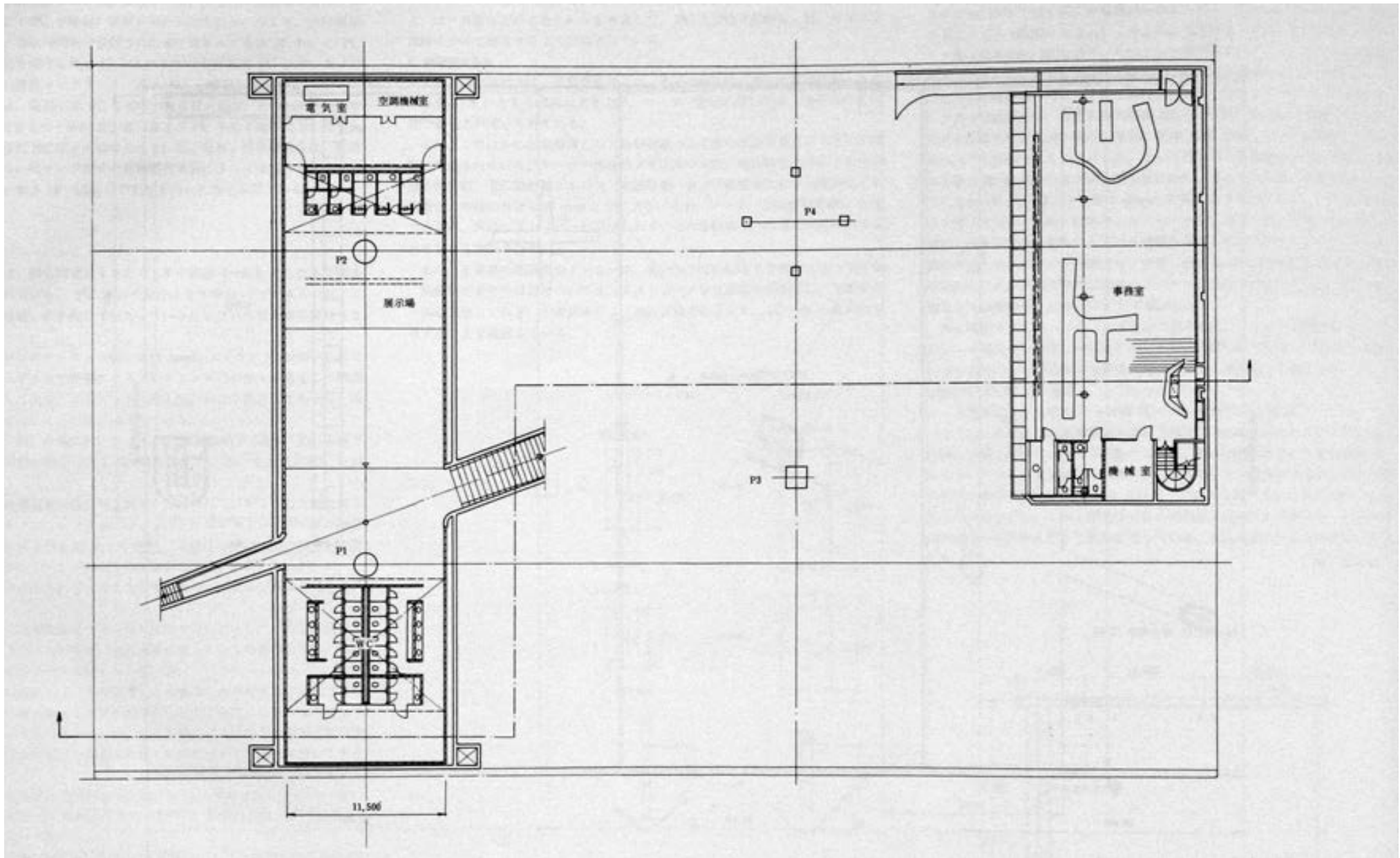


Figura 3.148. Programa a nivel de subsuelo del Pabellón de Brasil en Osaka

Fuente: Amaral, I. (2010), pp.338. Recuperado de: <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/4525>

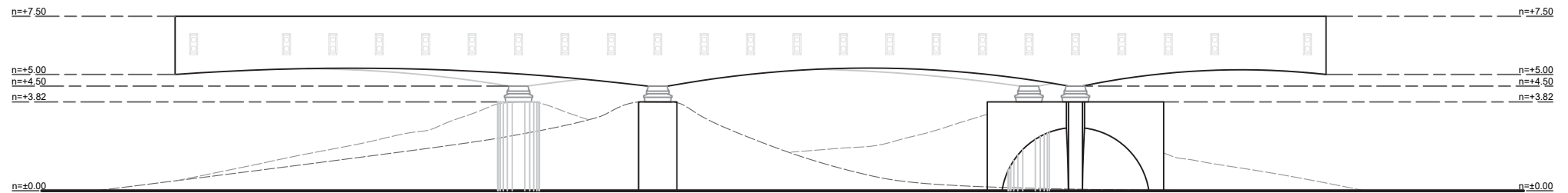


Figura 3.149. Elevación lateral del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc.1:250

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*

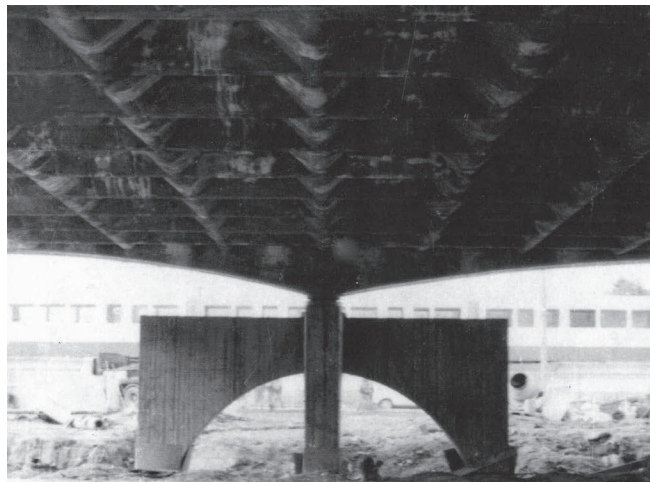


Figura 3.150. Encuentro pilar de arcos cruzados y cubierta del Pabellón de Brasil en Osaka

Fuente: Anónimo (s.f.) Cortesía: Archivo oficina PMR

tectónica a nivel global.

A su vez, de acuerdo a la clasificación de sistemas estructurales de Engel (2001), el particular sistema constructivo de la cubierta, define al pabellón como una “estructura de retícula de vigas”—con voladizos en los extremos—delimitada por las vigas sinuosas y cuya rejilla se encuentra compuesta por vigas de “punta de flecha”.

Estas dos partes de la estructura de la cubierta, para poder existir, necesitaron del postensado para su ensamblaje, y su construcción según Amaral (2010), tuvo como referencia a las estructuras de madera. De este modo, su lógica constructiva, originada a partir de técnicas de acople como la caja y espiga, de orden tectónico, permitió la ejecución de la cubierta como un elemento sólido, más bien de apariencia estereotómica. Vista en su totalidad la obra, se puede definir la misma como tectónica, debido a que los apoyos de neopreno, articulan tanto cubierta como soportes que son estereotómicos.

3.4.3.4 Análisis estructural

3.4.3.4.1 Construcción del modelo

Para la construcción del modelo del Pabellón de Brasil en Osaka se adopta la planta estructural de la cubierta. En la misma, se consideran seis módulos estructurales, correspondientes a las vigas en “v”, vigas de “punta de flecha” con una aleta alargada, vigas de “punta de flecha” tipo, los complementos prismáticos de las vigas tipo en los ejes “F” y “L”, y cada una de las vigas sinuosas.

En el caso de los soportes de sección regular—que se encontraban enterrados—, apenas existe información de la longitud—aparentemente aquella de sección cuadrada tiene la misma extensión que las circulares. Sin embargo, se pudo constatar en fotografías históricas, vigas que componen la losa de subsuelo, de la cual no se tiene información técnica, indispensable para un análisis de este tipo.

Bajo estas condiciones, se decide incorporar al análisis estructural la cubierta y el módulo estructural relacionado al pilar de arcos cruzados, y en el tramo donde existe transferencia de carga de los demás soportes se reemplaza por los grados de libertad de acuerdo al apoyo utilizado.

En primera instancia, para la construcción del único pilar visible, se considera uno de los arcos. Así, resulta más sencillo tener una visión del arco que será construido mediante cuadriláteros. Una vez que ha sido resuelto se realiza una copia rotada 90 grados, y se la ubica, de modo que interseque con el punto central del arco. En este soporte se emplearon un total de 192 elementos cuyas superficies no exceden los 0,35m².

A partir de este punto, se ubica la primera viga sinuosa, cuyo mallado está determinado por la rejilla de vigas que componen la cubierta. Estas vigas han sido representadas mediante elementos lineales debido a la complejidad de su forma. Para ello, se considera el centroide de las vigas en forma de “flecha que apunta hacia abajo”, a partir del cual se articula las demás vigas. Para la articulación de estos elementos fueron utilizados 113 elementos unidimensionales.

Finalmente, es configurada la restante viga principal

de borde, al igual que la anterior, con elementos bidimensionales. Estas vigas están compuestas por 204 piezas de superficies no mayores a 0,93m². Adicionalmente, en los sectores próximos a los puntos de apoyo—donde las regiones eran de mayor dimensión—se dividieron en elementos más pequeños, que permitan una lectura del análisis más precisa.

Una vez que se ha obtenido la información relativa a nodos y elementos, en *MATLAB*, se ingresan los espesores de los elementos bidimensionales utilizados para la construcción del pilar de arcos cruzados es de 0,7 metros y 1,2 metros para el ancho de las vigas sinuosas. Para los elementos lineales restantes de la cubierta mientras tanto, se ingresó información relacionada con su área y su momento de inercia—respecto a la cota del centroide de las vigas en “punta de flecha” tipo.

Fueron dos los módulos elásticos utilizados. El primero fue calculado a partir de la resistencia mínima a compresión del hormigón postensado correspondiente a 300 kg/cm² de acuerdo a la *Japan Society of Civil Engineers* (1961). Para los soportes que fueron fundidos en sitio, la *Japan Society of Civil Engineers* (1967) establece un f_{ck} mínimo—que considera una resistencia a los 28 días de 180 kg/cm². En el caso del primero, el módulo de elasticidad es de 25.497,229 MPa, mientras del segundo 19.750,06 MPa.

En relación a las propiedades mecánicas, los siguientes valores fueron empleados conforme a la norma *NEC-SE-DS* (2014): 0,0024 MN/m³ para la densidad del hormigón, 0,2 para el coeficiente de Poisson y 0,001 MN/m³ para la carga viva.

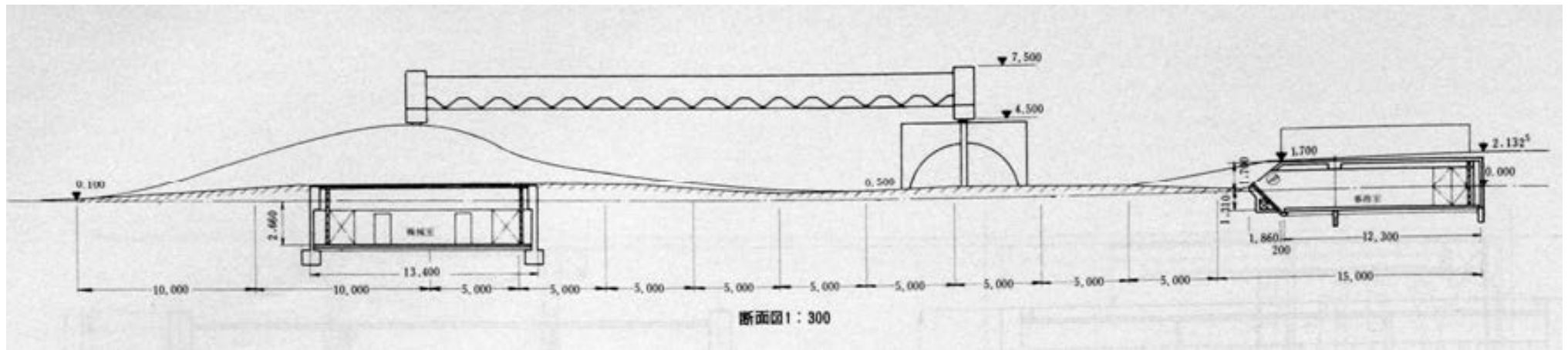


Figura 3.151. Corte transversal del Pabellón de Brasil en Osaka elaborado para la ejecución de la obra
 Fuente: Amaral, I. (2010), pp.340. Recuperado de: <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/4525>

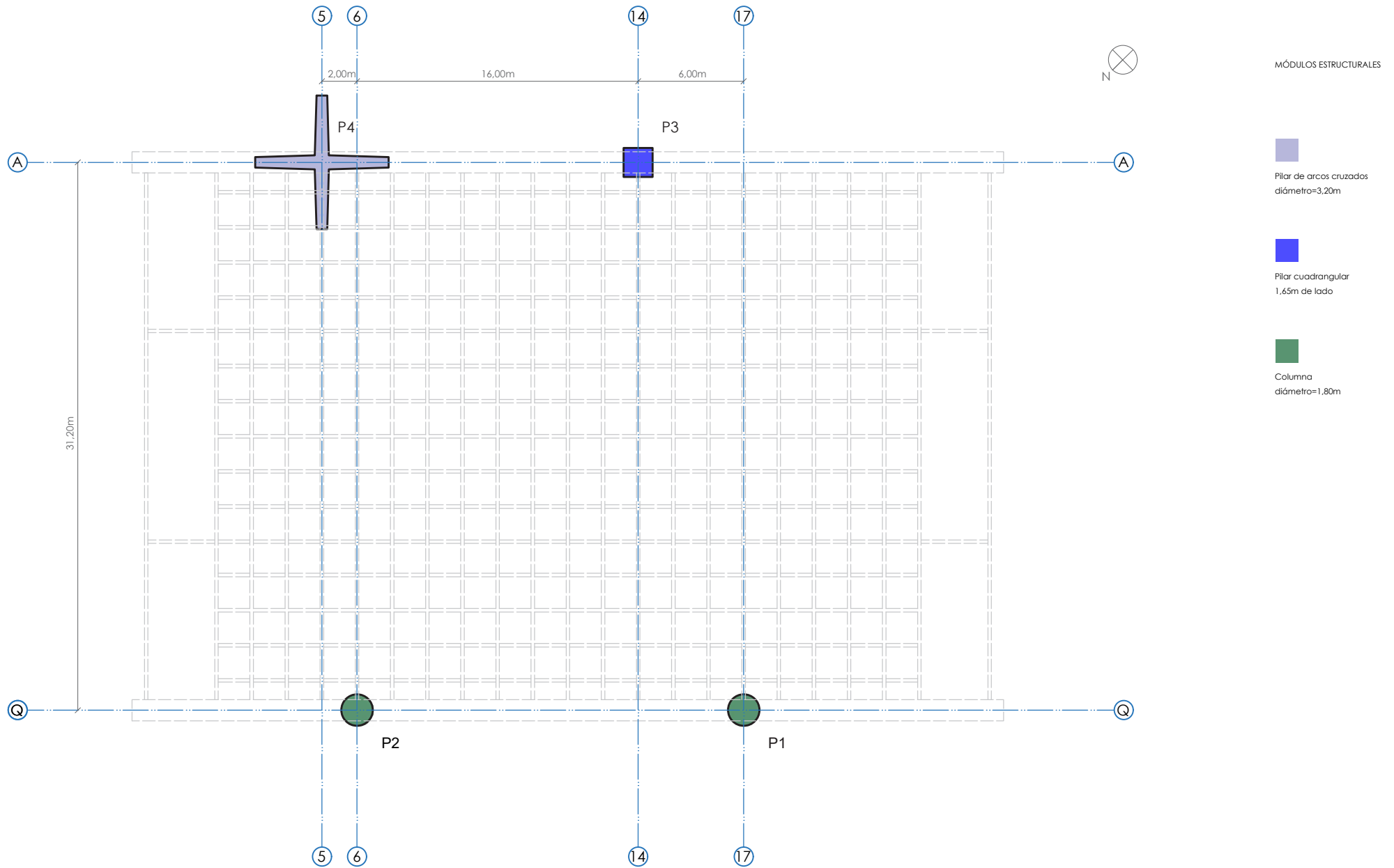


Figura 3.152. Planta baja estructural del Pabellón de Brasil en Osaka. . Esc. 1:300

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*

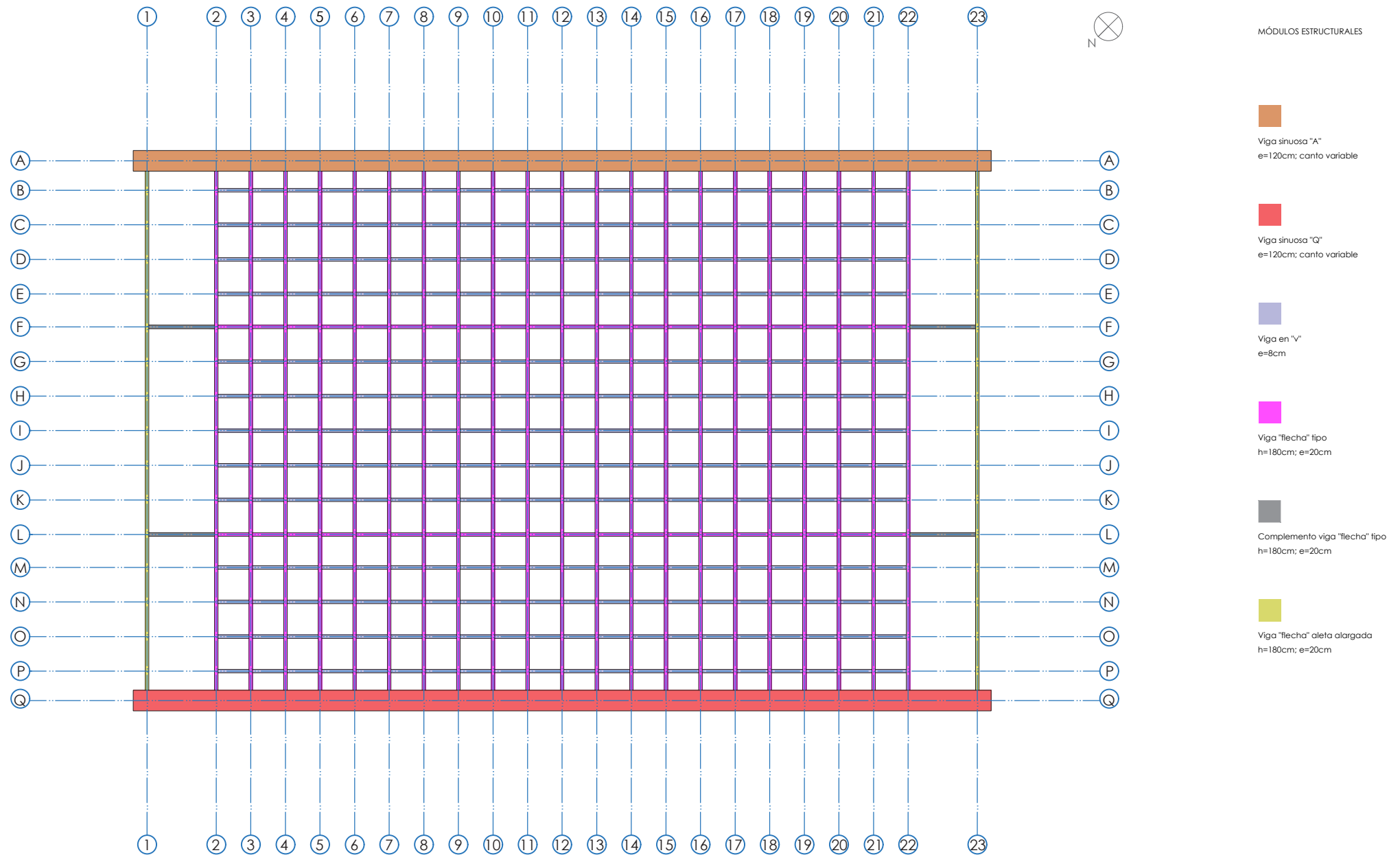


Figura 3.153. Planta de cubiertas estructural del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc.1:300

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*



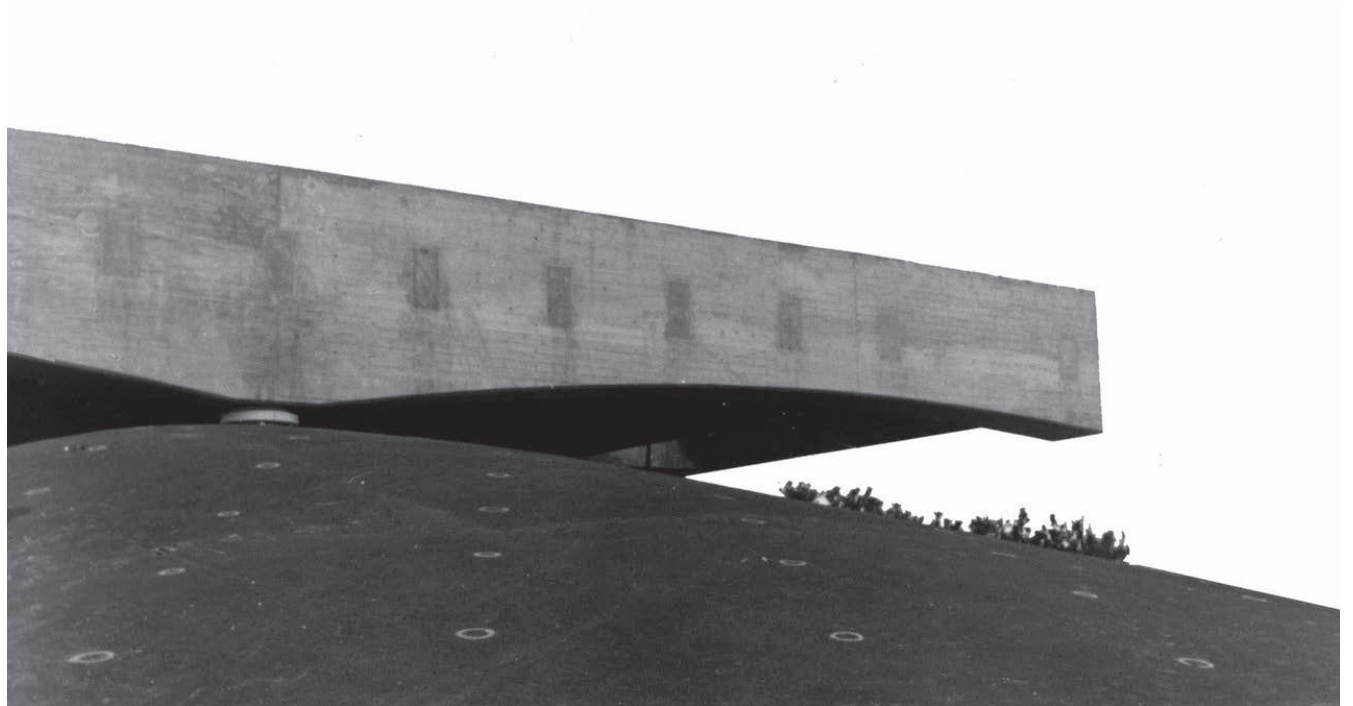


Figura 3.154. Marcas del postensado en sentido transversal sobre la viga sinuosa "Q"

Fuente: Archdaily (2014). Recuperado de: https://www.archdaily.com.br/br/624060/classicos-da-arquitetura-pavilhao-do-brasil-em-osaka-paulo-mendes-da-rocha-e-equipe?ad_medium=gallery

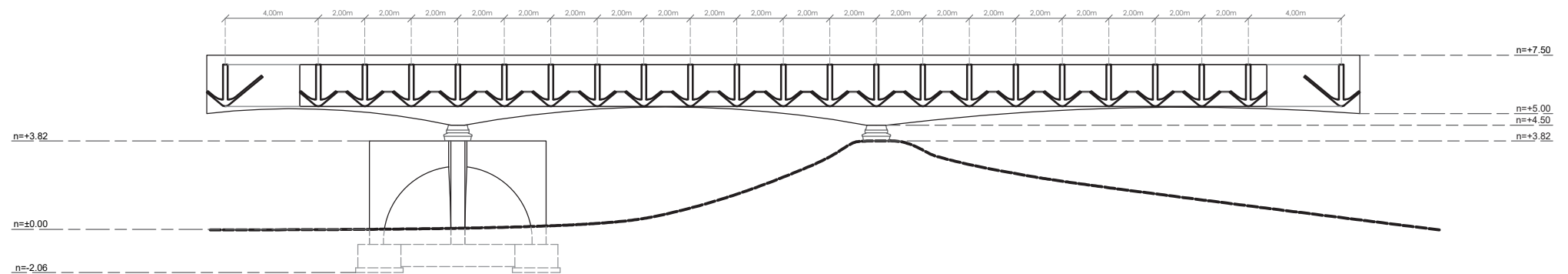


Figura 3.155. Sección longitudinal A-A' del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc. 1:250

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*



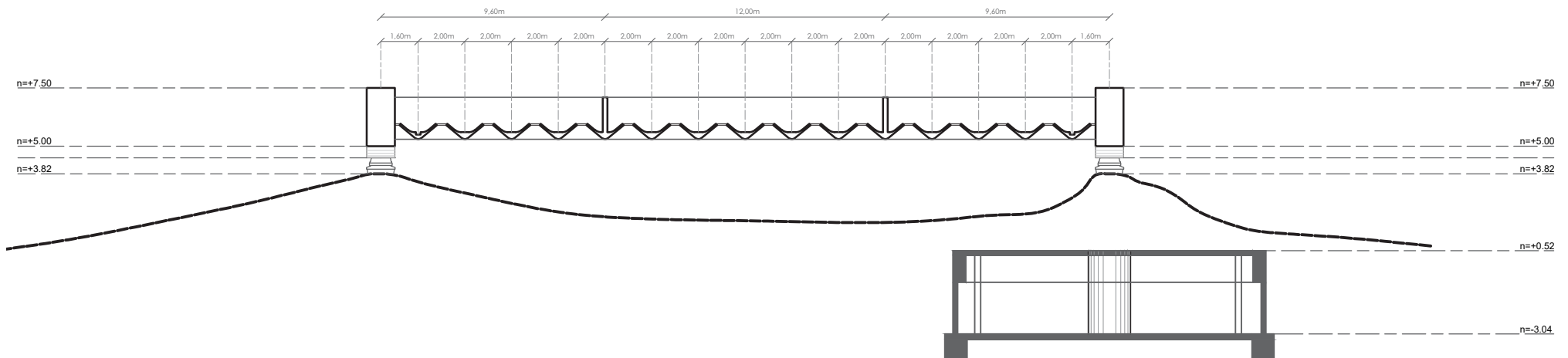


Figura 3.156. Sección transversal B-B' del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc.1:250

Fuente: Dibujo del autor a partir de información de la Asociación de arquitectos de la Prefectura de Osaka recopilada por Izabel Amaral en su tesis *Tensions techniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*

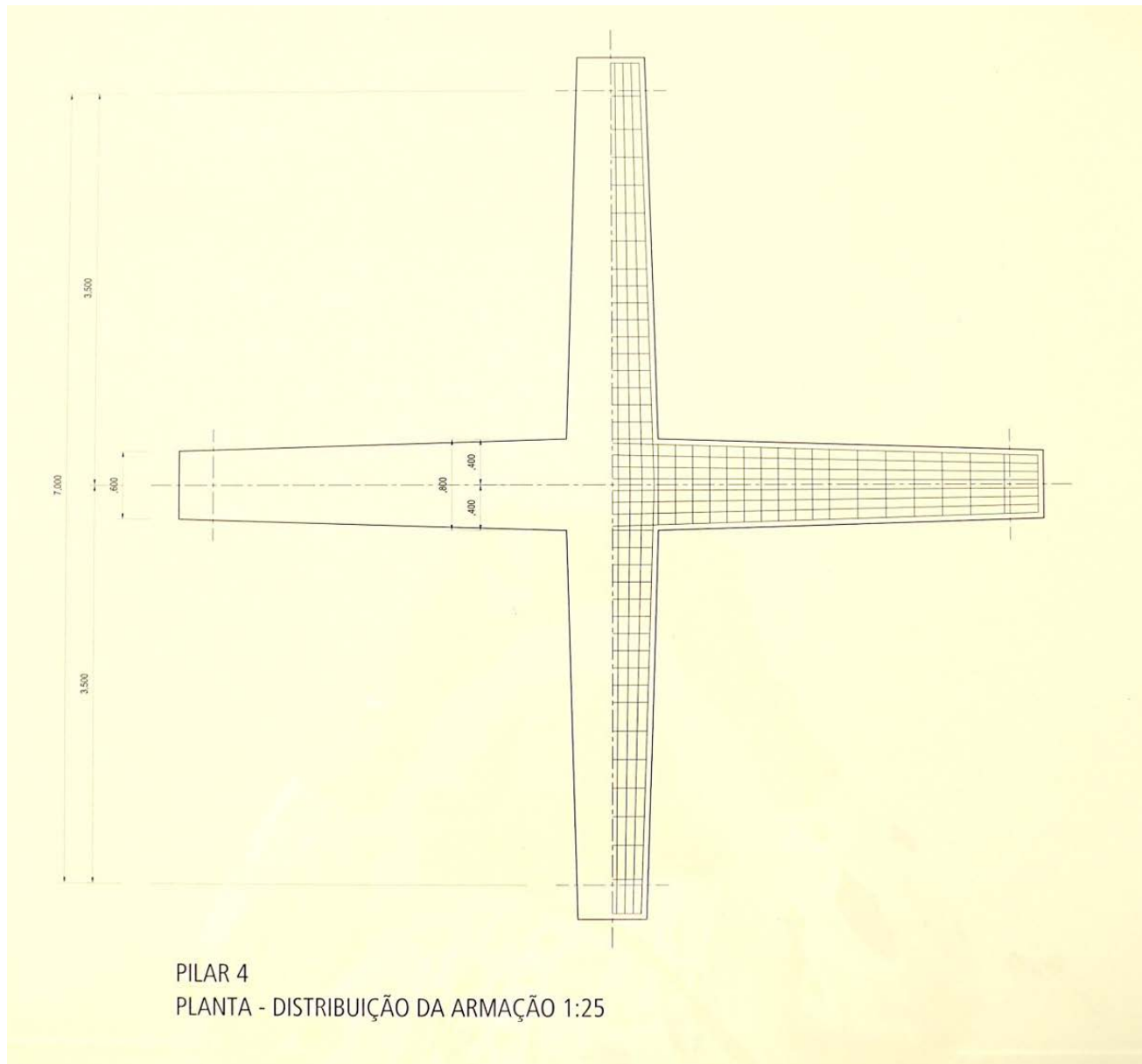


Figura 3.157. Planta del pilar de arcos cruzadosy arreglo de su armadura

Fuente: Exposición *Arquitetura de Exceção* – o *Pavilhão do Brasil na Expo'70 Osaka*. Cortesía de: Arq. Anália Maria Marinho de Carvalho Amorim

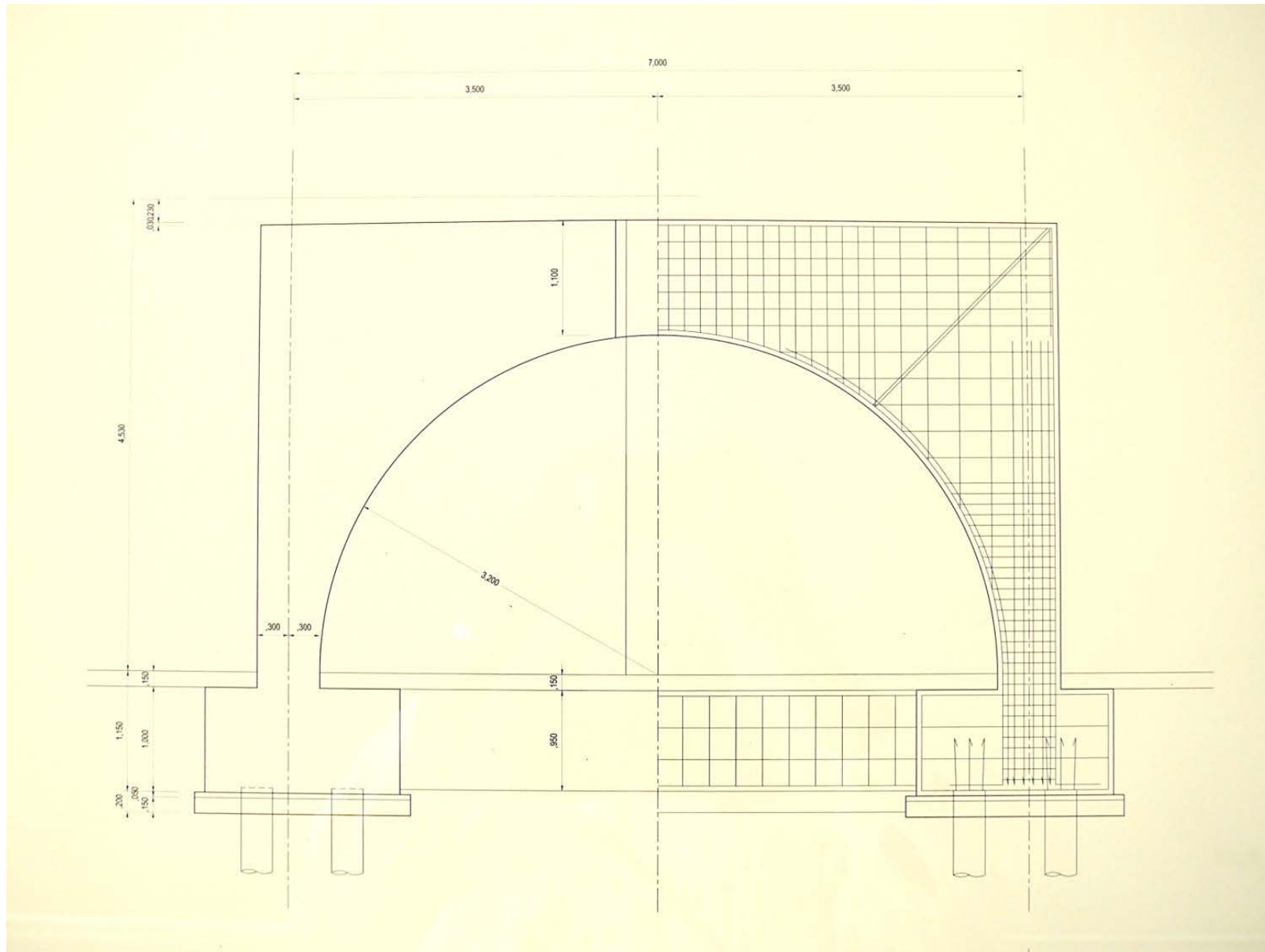


Figura 3.158. Vista frontal del pilar de arcos cruzados y arreglo de su armadura

Fuente: Exposición *Arquitetura de Exceção – o Pavilhão do Brasil na Expo'70 Osaka*. Cortesía de: Arq. Anália Maria Marinho de Carvalho Amorim

Los grados de libertad del pabellón han sido determinados al considerar la estructura de cubierta como simplemente apoyada sobre el pilar de arcos cruzados. En relación a este pilar, éste se encuentra empotrado al suelo, donde sus movimientos rotacionales y traslacionales han sido restringidos, mientras que, en el encuentro de este elemento con la viga sinuosa, se han restringido únicamente sus movimientos traslacionales. Esta misma decisión se adoptó para los distintos nodos donde la carga se transfería hacia los demás soportes.

Para el análisis espectral, la función del espectro utilizada fue realizada por el Ing. Hernán García, misma que necesita ser provista del período característico de acuerdo al tipo de suelo (T_c), coeficiente estándar de cortante (C_0), y la aceleración espectral (ag). De acuerdo al estudio de suelos de Kamoshita (1959), el suelo de la Prefectura de Osaka es un “suelo de montaña” conformado por roca sedimentaria (Geological Survey of Japan, s.f.) que corresponde al tipo de suelo “I”, según la tabla de “Definiciones de tipo de suelo y periodos característicos (T_c)” de Japón, lo que equivale a un T_c de 0,4s (Yu, Asce, Chock & Asce, 2016).

Mientras tanto, según la *Japan Seismic Hazard Information Station* (s.f.), la aceleración sísmica de la zona donde se situaba el pabellón corresponde a un “6-bajo” en la escala sísmica de Shindo ó 2,50-3,15 m/s²—en un periodo de retorno de 500 años—, a partir de la cual se obtiene la aceleración espectral de 0,3g. En virtud de este último valor—que corresponde a un sismo moderado—, se emplea un valor de 0,3 para C_0 (Yu, Asce, Chock & Asce, 2016).

3.4.3.4.2 Interpretación del modelo

a) Análisis modal

Modo 1. En el primer modo—cuyo periodo es de 0,443s—se observa que, el movimiento en la estructura se origina a partir de la excitación en “Z” de los volados de las vigas perimetrales a partir de los soportes “P1” y “P3”, y que apenas se traslada el extremo opuesto del pabellón.

Así, cuando el volado de la viga “A” asciende, se comprime el tramo comprendido entre los pilares “P3” y “P4”, de manera que trabajan los arcos cruzados que componen el pilar (Fig.3.159). Este efecto de compresión apenas se advierte en la otra viga perimetral.

Modo 2. El segundo modo—de periodo igual a 0,311s—indica que los volados que se desarrollan a partir de los pilares “P4” y “P2”, se desplazan verticalmente. A partir de este movimiento, cuando estos elementos ascienden, tienden a rotar hacia adentro, y cuando descenden, rotan hacia afuera (Fig.3.160). El tramo en volado a partir de la viga “P2”, es aquel que más se flexiona de entre los dos pilares. A diferencia del anterior modo, es evidente el desplazamiento relativo que se presenta en los extremos de ambas vigas.

Modo 3. En el tercer modo, se observa que, cuando existe una excitación de la viga “A”, cada uno de sus volados al comprimirse—producto de este movimiento—imprimen fuerza sobre el pilar de arcos cruzados (Fig.3.161). Este modo se caracteriza por un periodo de 0,272s.

La fuerza que se transmite hacia la otra viga periférica se manifiesta en un movimiento alternado de sus

volados.

Modo 4. El cuarto modo ($T=0,24s$) evidencia la excitación en “Z” de los extremos de la viga “Q”. En relación al movimiento de este elemento, la viga se comprime en su tramo medio comprendido entre las columnas “P2” y “P1”, consecuencia del desplazamiento vertical de sus extremos de manera simultánea. Mientras que, este movimiento en la viga “A”, se presenta en el desplazamiento de los volados de manera alternada, de modo que cuando el volado a partir del pilar “P4” se comprime, ejerce fuerza sobre el pilar (Fig.3.162).

Modo 5. En este modo ($T=0,186s$) la excitación de la estructura se advierte a partir de sus vigas periféricas, en las que, sus volados se desplazan verticalmente de manera alternada. De este modo, mientras que, los volados “P2” y “P4” ascienden, los restantes descenden. Este movimiento oscilatorio deforma a la viga en forma de “s” (Fig.3.163).

Modo 6. Este modo de vibrar—que le corresponde un periodo de 0,153s—se caracteriza por el movimiento en “Y” de toda la estructura de cubierta. Los desplazamientos relativos que mayormente se advierten ocurren en los extremos de cada volado, y la parrilla adopta una forma de “s” durante el periodo de vibración. En el pilar visible es posible distinguir dos fenómenos a partir de cada uno de los arcos que componen el elemento (Fig.3.164). El arco ubicado a lo largo del eje “X”, se pandea, mientras que el arco restante que lo interseca, se mueve en dirección “Y”.

Modo 7. Similar al tercer modo de vibrar, la viga “Q” es excitada en cada uno de los extremos de manera



simultánea, lo que ocasiona la compresión del tramo comprendido entre las columnas. Las vigas de borde transmiten este movimiento a la viga “A”, cuyos volados se desplazan verticalmente de manera alternada, y que cuando el volado del pilar “P4” se comprime, trasmite a su vez fuerza al pilar de arcos cruzados (Fig.3.165). A este modo de vibrar le corresponde un periodo de 0,149s.

Modo 8. Este modo de vibrar ($T=0,145s$) ocurre a partir de la excitación de los volados “P2” y “P4” de manera alternada, esto es, mientras un volado se flexiona, el otro se comprime, lo que ocasiona la deformación de la viga que amarra a ambos elementos en los extremos. Se advierte en el otro extremo del pabellón el movimiento conjunto de los volados restantes y la cubierta, aunque en mucha menor medida (Fig.3.166).

Modo 9. El comportamiento de la estructura de cubierta del pabellón se caracteriza por el movimiento torsional-vertical a partir de los soportes ($T=0,122s$), lo que origina la flexión en las vigas periféricas que los arriostran. Este movimiento torsional a su vez provoca que los volados de los soportes “P4” y “P2” además de torsionarse, se desplacen en sentido vertical, lo que provoca la flexión del arco del pilar perpendicular a las vigas. Es evidente, además, que el volado “P3” y el tramo comprendido entre los soportes “P4” y “P3”, son aquellos que tienden a comprimirse y traccionarse en mayor medida (Fig.3.167).

Modo 10. En este modo—de periodo igual a 0,119s—la estructura se mueve con respecto al eje “Y”. Cuando la una mitad de la estructura se mueve, esto es, a partir de los pilares “P2” y “P4”, otra parte se desplaza en el sentido opuesto a partir de los soportes “P1” y

“P3” (Fig.3.168). El comportamiento del pilar de arcos cruzados es el mismo del modo 6.

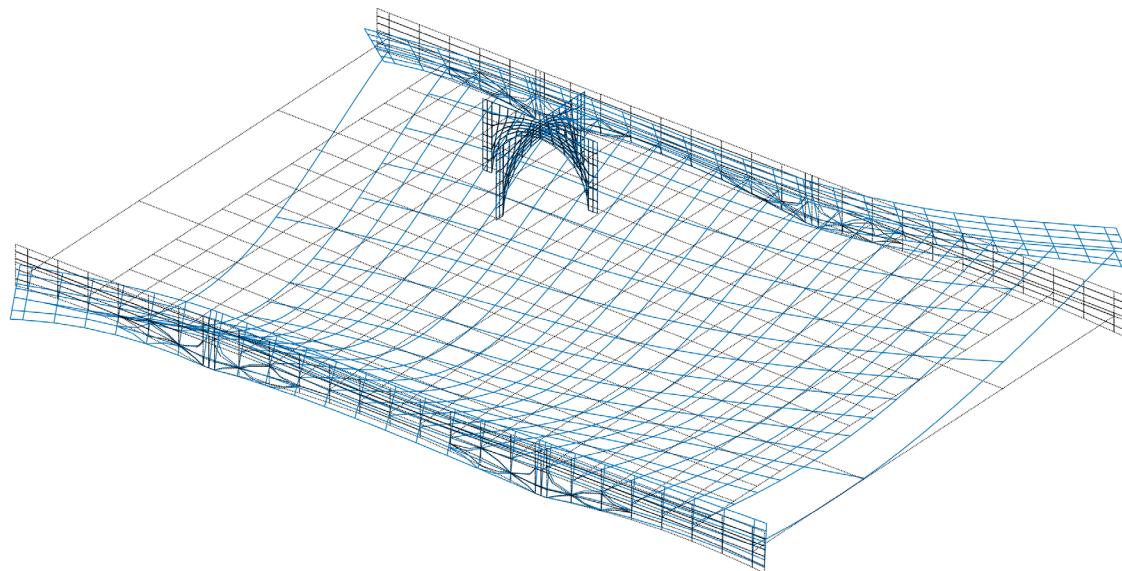


Figura 3.160. Segundo modo vibrar ($T=0,311s$) del Pabellón de Brasil en Osaka
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

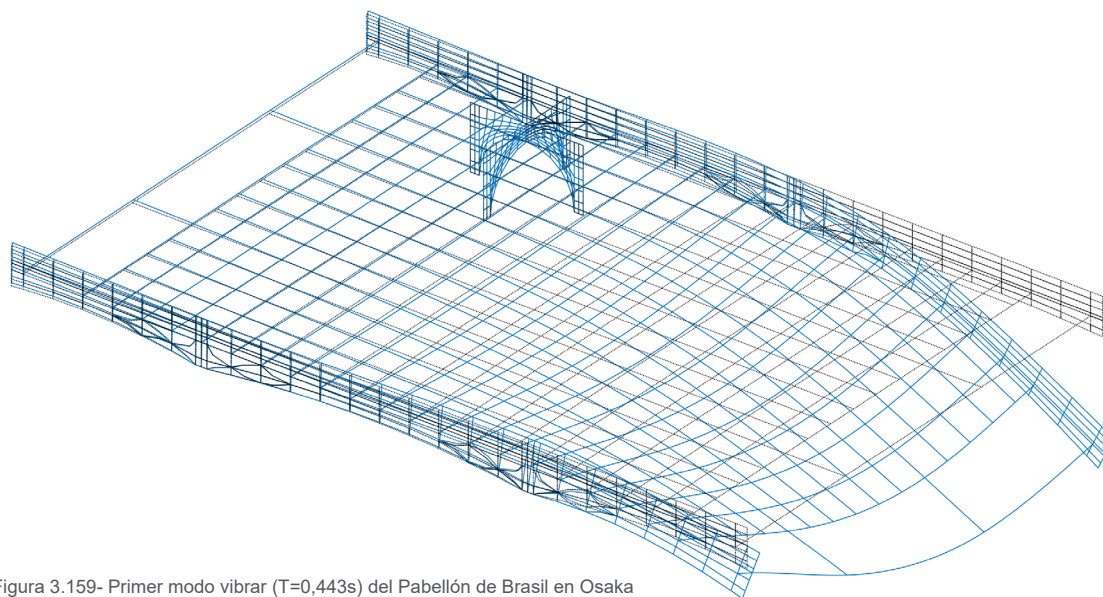


Figura 3.159- Primer modo vibrar ($T=0,443s$) del Pabellón de Brasil en Osaka
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

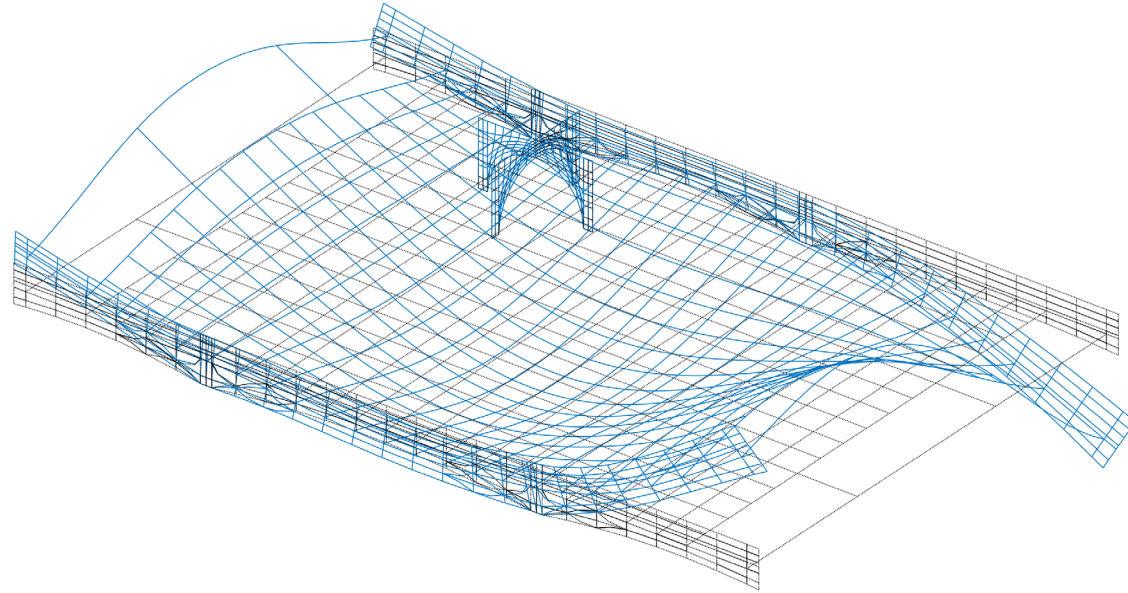


Figura 3.162. Cuarto modo vibrar ($T=0,24s$) del Pabellón de Brasil en Osaka
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

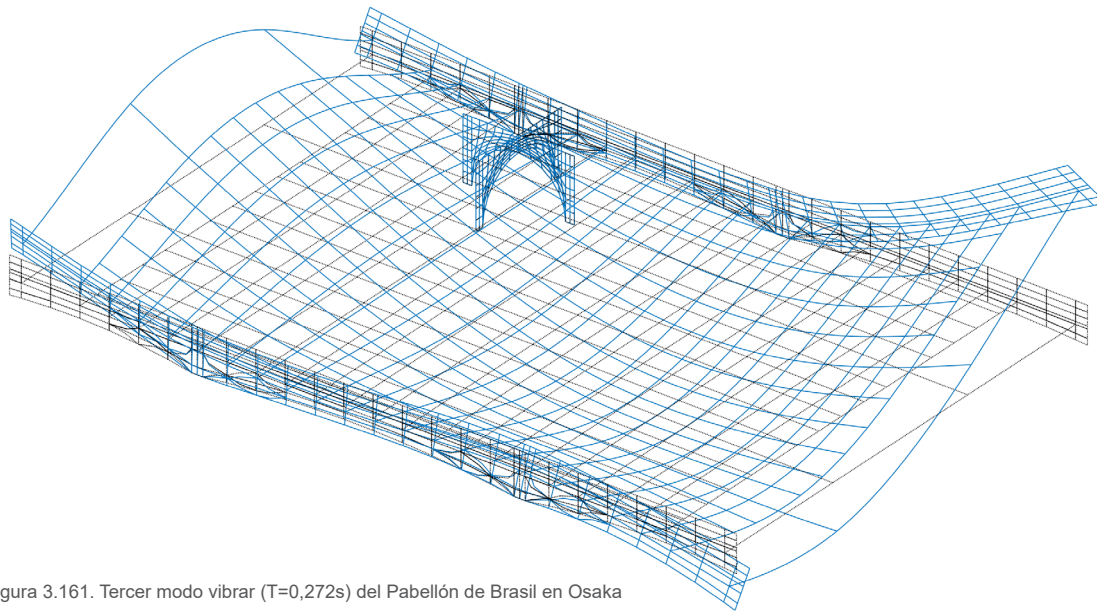


Figura 3.161. Tercer modo vibrar ($T=0,272s$) del Pabellón de Brasil en Osaka
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

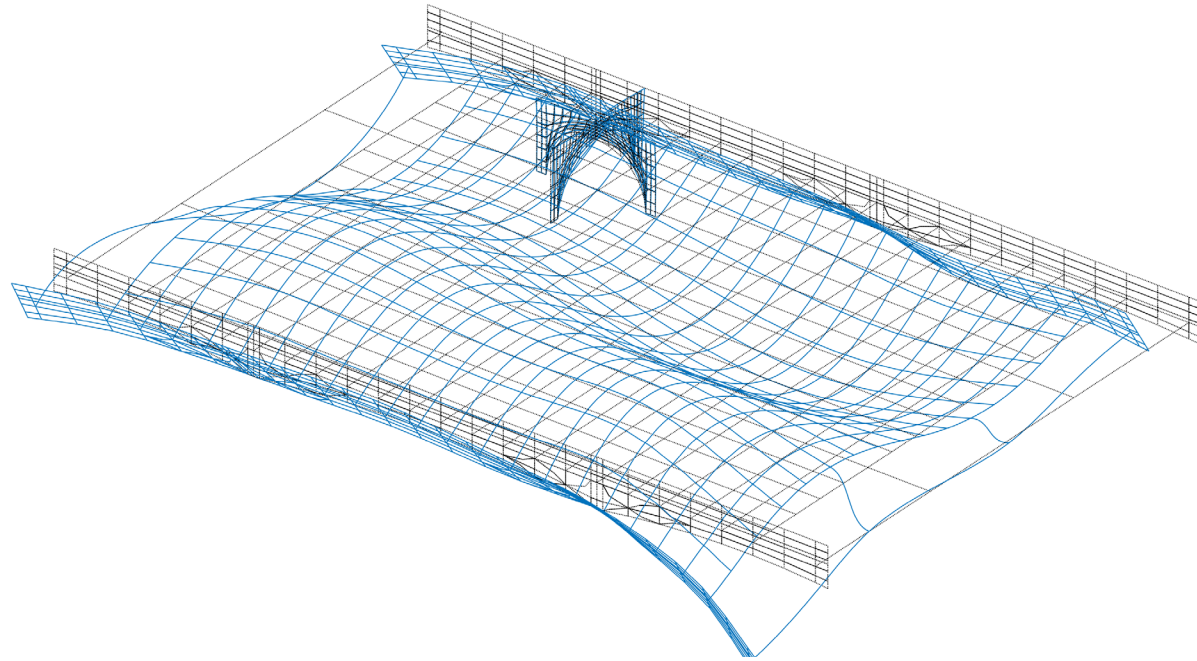


Figura 3.164- Sexto modo vibrar ($T=0,153s$) del Pabellón de Brasil en Osaka

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

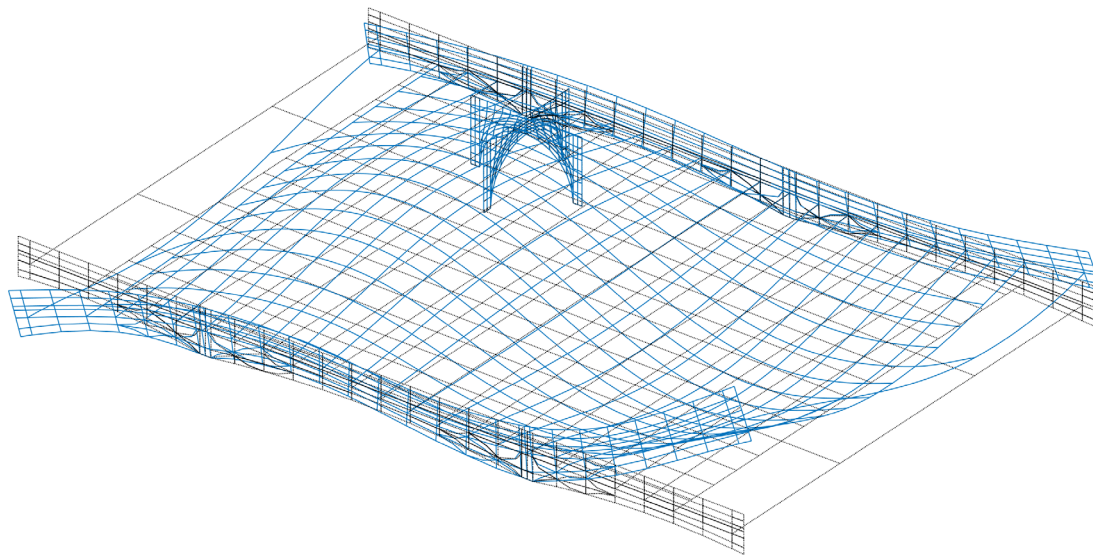


Figura 3.163. Quinto modo vibrar ($T=0,186s$) del Pabellón de Brasil en Osaka

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



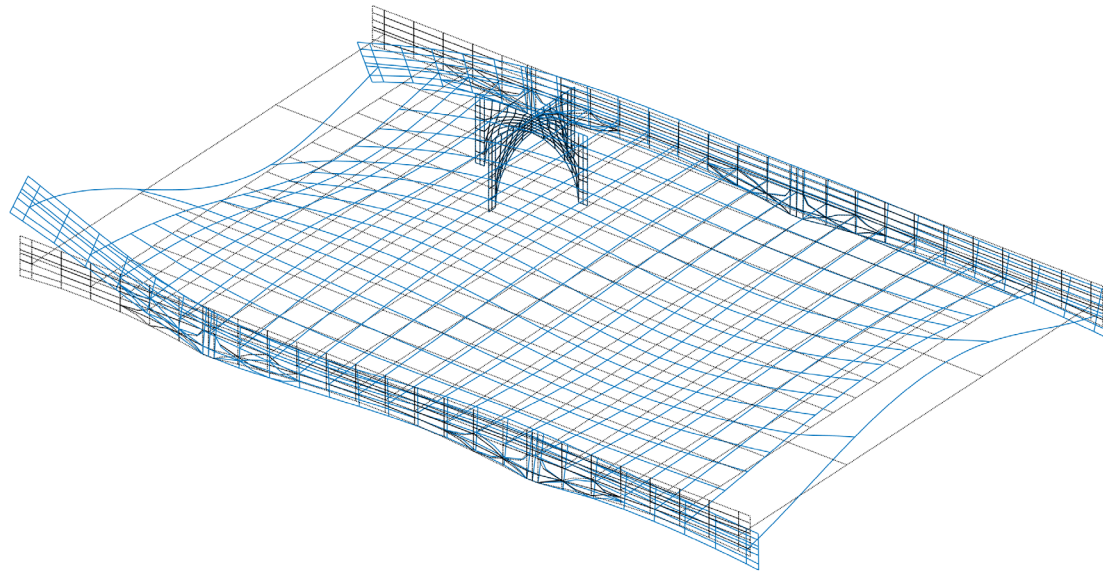


Figura 3.166. Octavo modo vibrar ($T=0,145s$) del Pabellón de Brasil en Osaka

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

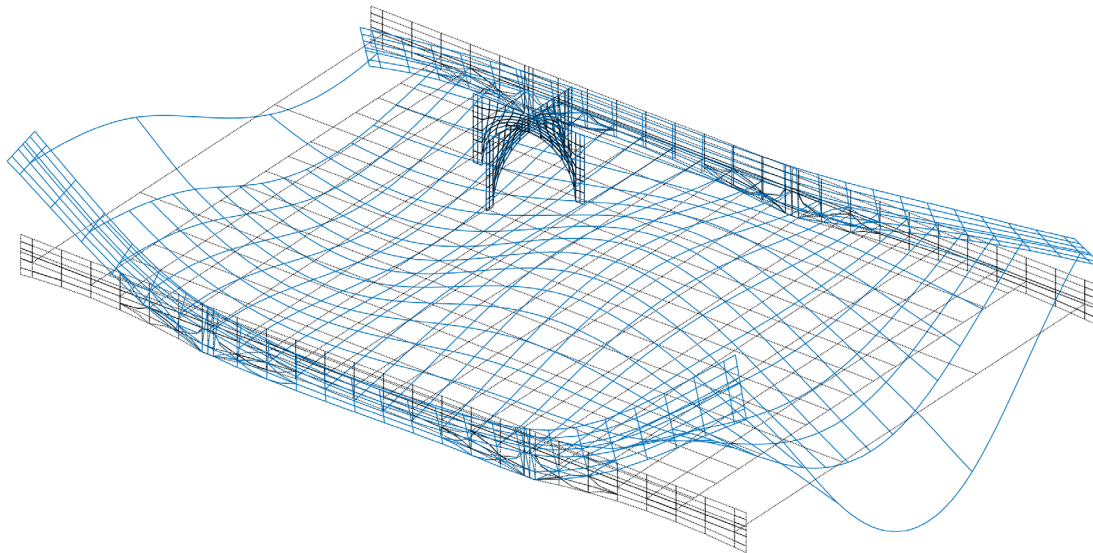


Figura 3.165. Séptimo modo vibrar ($T=0,149s$) del Pabellón de Brasil en Osaka

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

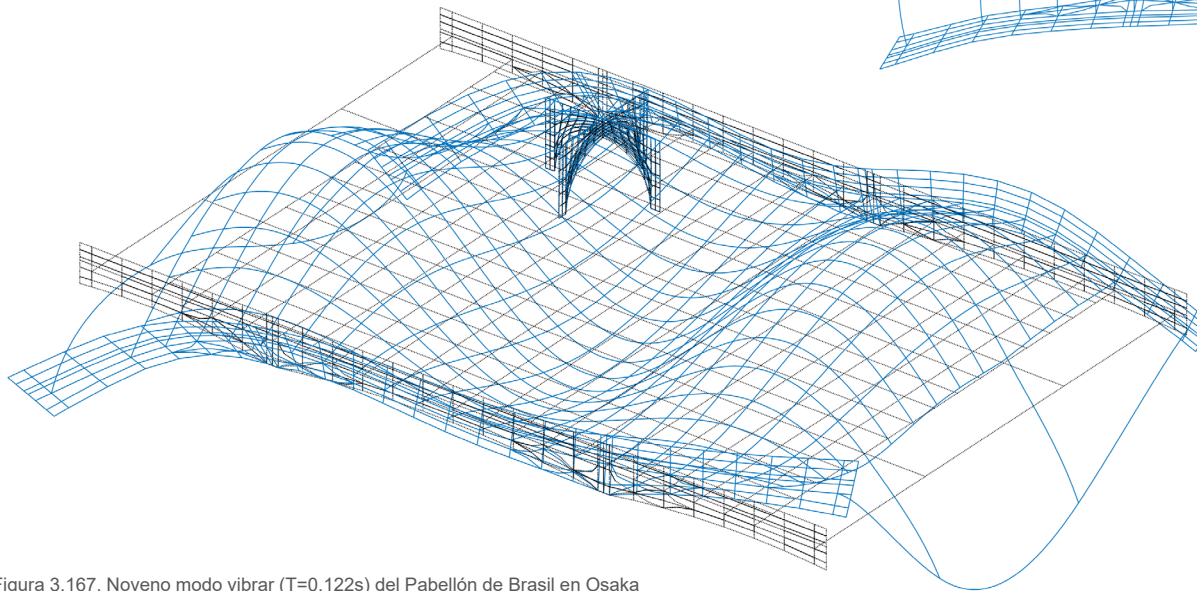


Figura 3.167. Noveno modo vibrar ($T=0,122s$) del Pabellón de Brasil en Osaka
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

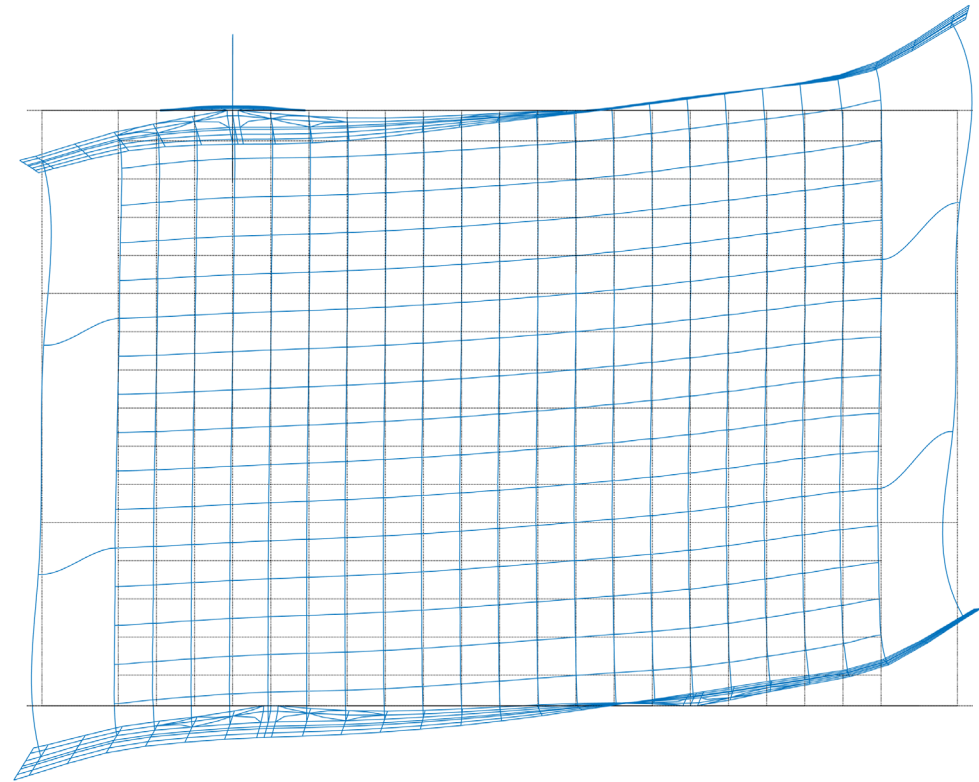


Figura 3.168. Décimo modo vibrar ($T=0,119s$) del Pabellón de Brasil en Osaka
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

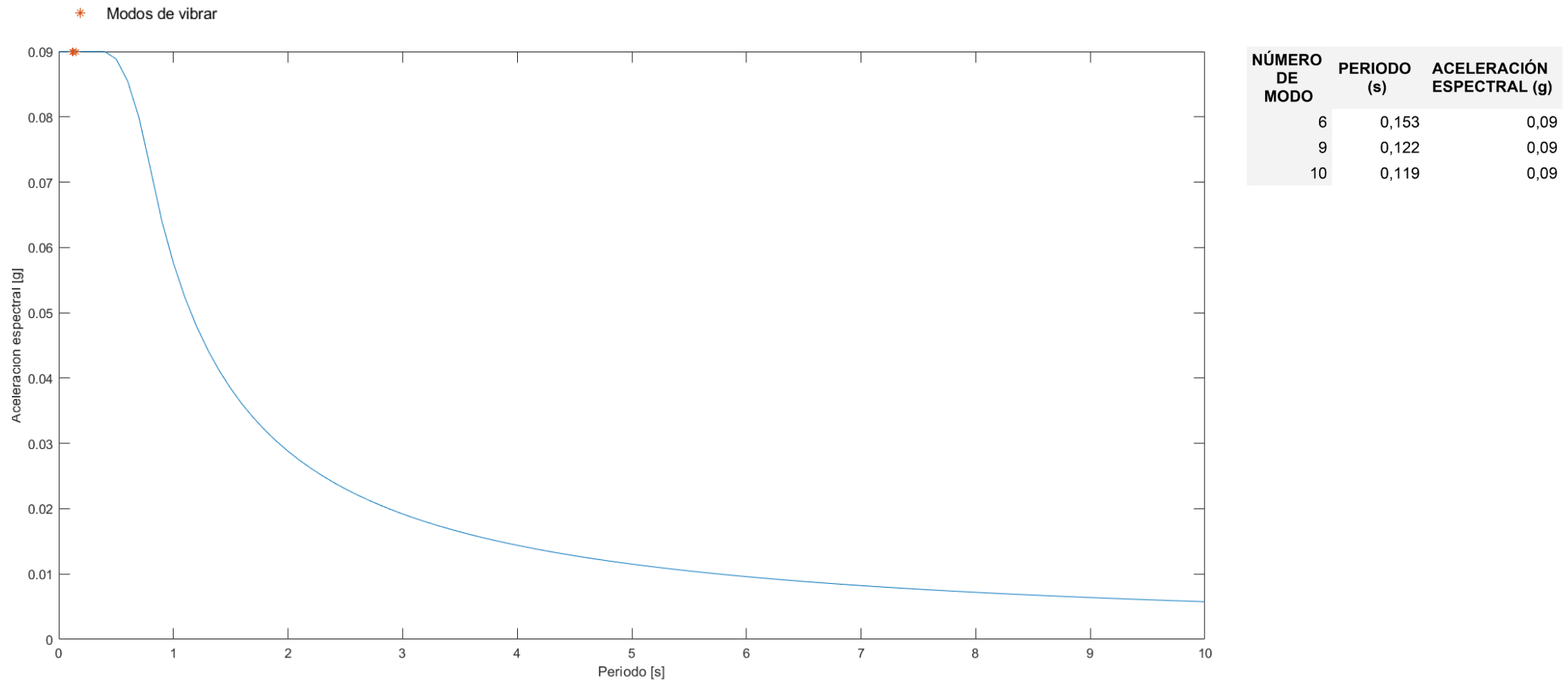


Figura 3.169. Función del espectro del Pabellón de Brasil en Osaka

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

b) Espectro

A partir de la interpolación del período de la estructura con el del terreno y la aceleración espectral de este último, se obtiene la función del espectro, en la que han determinados de interés los modos 6, 9 y 10.

El período y aceleración espectral de estos modos de vibrar resulta indispensable para cálculo de esfuerzos y desplazamientos es presentado en la figura 3.169, a partir del cual se observa como todos los modos de vibrar de interés alcanzan la aceleración espectral máxima.

Con estos modos de vibrar de interés, es posible determinar que la aceleración espectral máxima tiene un valor de 0,09g igual a $0,8829 \text{ m/s}^2$ que se le imprimirá a la masa de la estructura del pabellón.

La masa total de la estructura es de 2,1764 MKg, por lo que la masa que más participa en "X" igual a 0,0693 MKg del noveno modo de vibrar equivale apenas al 3,184% de la masa.

De este modo, la fuerza producida por el espectro en "X" es de 0,0611 MN.

En dirección "Y" mientras tanto, la masa con mayor participación le corresponde al sexto modo de vibrar y es igual a 1,1492 MKg equivalente al 52,80%.

Así la fuerza espectral en dirección "Y" es de 1,0146 MN.

c) Esfuerzos normales

Esfuerzo normal "sx" en función de fuerza modal "sjx"

En este caso predominan esfuerzos normales entre 16,35 MPa y -4,81 MPa. En el tramo comprendido entre los soportes "P1" y "P2", se presentan esfuerzos a tracción en ciertas zonas—a medida que se aproxima al punto medio del arco—, mientras que, los esfuerzos negativos se distribuyen mayormente a medida que se acercan a los soportes, alcanzando esfuerzos de hasta -54,21 MPa en la región próxima al pilar "P1", en torno al cual aparecen también elevados esfuerzos puntuales positivos—hasta 178,65 MPa correspondiente al esfuerzo máximo, y negativos (-181,23 MPa). Mientras tanto, en la zona cercana a la base del pilar "P2" se presentan esfuerzos de tracción de hasta 79,86 MPa; adicionalmente, cerca de la viga transversal #4, aparece un esfuerzo negativo puntual de -244,75 MPa (esfuerzo máximo negativo) (Fig.3.170).

Por su parte, en la viga "A", no se presentan esfuerzos a tracción próximos al arco comprendido entre los soportes "P3" y "P4". Mas bien estos esfuerzos se desarrollan en la parte superior de la viga sinuosa en torno al pilar "P3", en un tramo comprendido entre las vigas transversales #10 y #20, correspondiente a 20 metros. Similar a las regiones cercanas a los pilares antes mencionadas, en este caso, los esfuerzos de hasta -47,15 MPa, y además aparecen esfuerzos de tracción puntuales de hasta 101,03 MPa (Fig.3.170).

Finalmente, en el caso de la región de la viga A, próxima al pilar "P4", los esfuerzos a compresión puntuales disminuyen respecto al resto (37,52 MPa) (Fig.3.170).

Esfuerzo normal "sx" en función de fuerza modal

"sjy"

La lógica de la distribución de estos esfuerzos, es similar al esfuerzo ocasionado por "sjx". Así, los esfuerzos predominantes presentes en las vigas sinuosas disminuyen a 9,92 MPa y -3,85 MPa. Del mismo modo, los esfuerzos puntuales se sitúan en las regiones antes mencionadas, aunque ahora el esfuerzo máximo a tracción es de 168,40 MPa, y el esfuerzo máximo de compresión apenas aumenta a -245,03 MPa (Fig.3.171).

Esfuerzo normal "sy" en función de fuerza modal "sjx"

Este esfuerzo se manifiesta de manera homogénea en las vigas sinuosas con un valor correspondiente a -0,04 MPa. Donde sí es evidente la presencia de esfuerzos, es en el arco del pilar que se desarrolla en "Y". Aquí, los esfuerzos más elevados tanto a tracción (6,17 MPa) como a compresión (-5,85 MPa) se ubican en la proximidad a la viga "A". A medida que estos esfuerzos se acercan al arco, los mismos se invierte y disminuyen. Esto es, el esfuerzo de compresión máximo alcanza 1,96 MPa, mientras el esfuerzo a tracción máximo alcanza los -2,04 MPa. Además, los esfuerzos que se sitúan en los apoyos del pilar son aún menores (-0,04 MPa) (Fig.3.172).

Esfuerzo normal "sy" en función de fuerza modal "sjy"

La distribución de los esfuerzos es la misma en el esfuerzo normal "sy" ocasionado por la fuerza modal "sjx, y apenas presenta diferencias relacionadas con la magnitud de los mismos. En el caso de las vigas



sinuosas presentan esfuerzos uniformes de -0,04 MPa, mientras en el arco en y del pilar, el esfuerzo máximo a compresión es de -5,23 MPa y el esfuerzo máximo de tracción es de 5,54 MPa (Fig.3.173).

Esfuerzo normal “sz” en función de fuerza modal “sjx”

Aquí, los esfuerzos normales tanto de las vigas como del pilar presentan esfuerzos de -4,44 MPa que se distribuyen de manera homogénea, salvo en las regiones cercanas a los soportes. En estas últimas, se aprecia como en torno al pilar “P2”, aparecen esfuerzos puntuales de 220,56 MPa y -213,37 MPa. En el caso del pilar “P1”, se ubica el esfuerzo máximo puntual a tracción de 477,71 MPa y un esfuerzo a compresión puntual de hasta -454,45 MPa. En relación al soporte “P3”, aparecen esfuerzos de hasta 91,98 MPa y -133,01 MPa. En torno al único pilar visible aparece un esfuerzo puntual apenas visible de 108,06 MPa, y el arco en el que se advierte esfuerzos en esta dirección, presenta esfuerzos a compresión de -20,51 MPa (Fig.3.174).

Esfuerzo normal “sz” en función de fuerza modal “sjy”

La lógica de la distribución de los esfuerzos es la misma del anterior esfuerzo normal, y se diferencian en la magnitud de los mismos. Así, en torno al pilar “P1”, el esfuerzo máximo a compresión y tracción de -459,33 MPa y 450,58 MPa respectivamente, siendo ambos de tipo puntual, mientras el pilar “P2” presenta esfuerzos de igual manera puntuales de hasta 207,93 MPa y -216,69 MPa. En el caso del pilar “P3”, los esfuerzos ascienden a 116,94 MPa y -140,86 MPa respecto al anterior. Finalmente, en relación al pilar “P4”, el esfuerzo puntual máximo es de 101,78 MPa. Adicionalmente en la parte

superior del arco los esfuerzos que se distribuyen alcanzan el valor de -19,54 MPa (Fig.3.175).

d) Desplazamientos: deriva

Para el cálculo de la deriva se considera como referencia el plano de cada lado del perímetro de la cubierta.

En el plano establecido por la viga sinuosa “A”, el mayor desplazamiento es de 0,0022 metros—consecuencia del sismo en “Y”—, y ocurre en el nodo 252, ubicado al extremo del volado más pronunciado; mientras la deriva de este plano es de 0,000378 (Fig.3.176).

Para el plano originado a partir de la viga sinuosa “B”, el desplazamiento mayor es de 0,0032 metros—producto del sismo en “Y”—, y se presenta en el nodo 636, ubicado en el eje del soporte “P1”; mientras la deriva de este plano es de 0,00055 (Fig.3.176).

A partir del centroide de la viga punta de flecha #1, se ha considerado un plano para el cálculo de la deriva del plano que proyecta esta línea. De este modo, el mayor desplazamiento ocurre en el nodo 711 y corresponde al punto donde se intersecan la viga #1 y “F”, debido al sismo en “X”. Dicho desplazamiento es de 0,00031 metros, mientras la deriva es de 0,000053 (Fig.3.176).

La viga de borde opuesta que arriostra las vigas sinuosas, ha sido considerada también. Así, es el nodo 713 el que presenta mayor desplazamiento 0,00055 metros y se sitúa en la intersección de la viga #23 y la viga “F”, así mismo, debido al sismo en “X”. La deriva mientras tanto, es de 0,000094 (Fig.3.176).

e) Participación de la masa

En dirección “X” la masa que mayor porcentaje representa corresponde al noveno modo de vibrar y es igual a 3,18%. En el caso de los otros dos modos examinados, los valores llegan apenas a 0,019% como es el caso del décimo modo de vibrar.

Con respecto a la dirección “Y”, el panorama es totalmente diferente, al incrementar el valor máximo de manera sustancial y representar el 52,80% de la masa transportada en el sexto modo de vibrar. De los dos modos restantes, el noveno es aquel que más masa moviliza con el escaso valor de 0,18%.

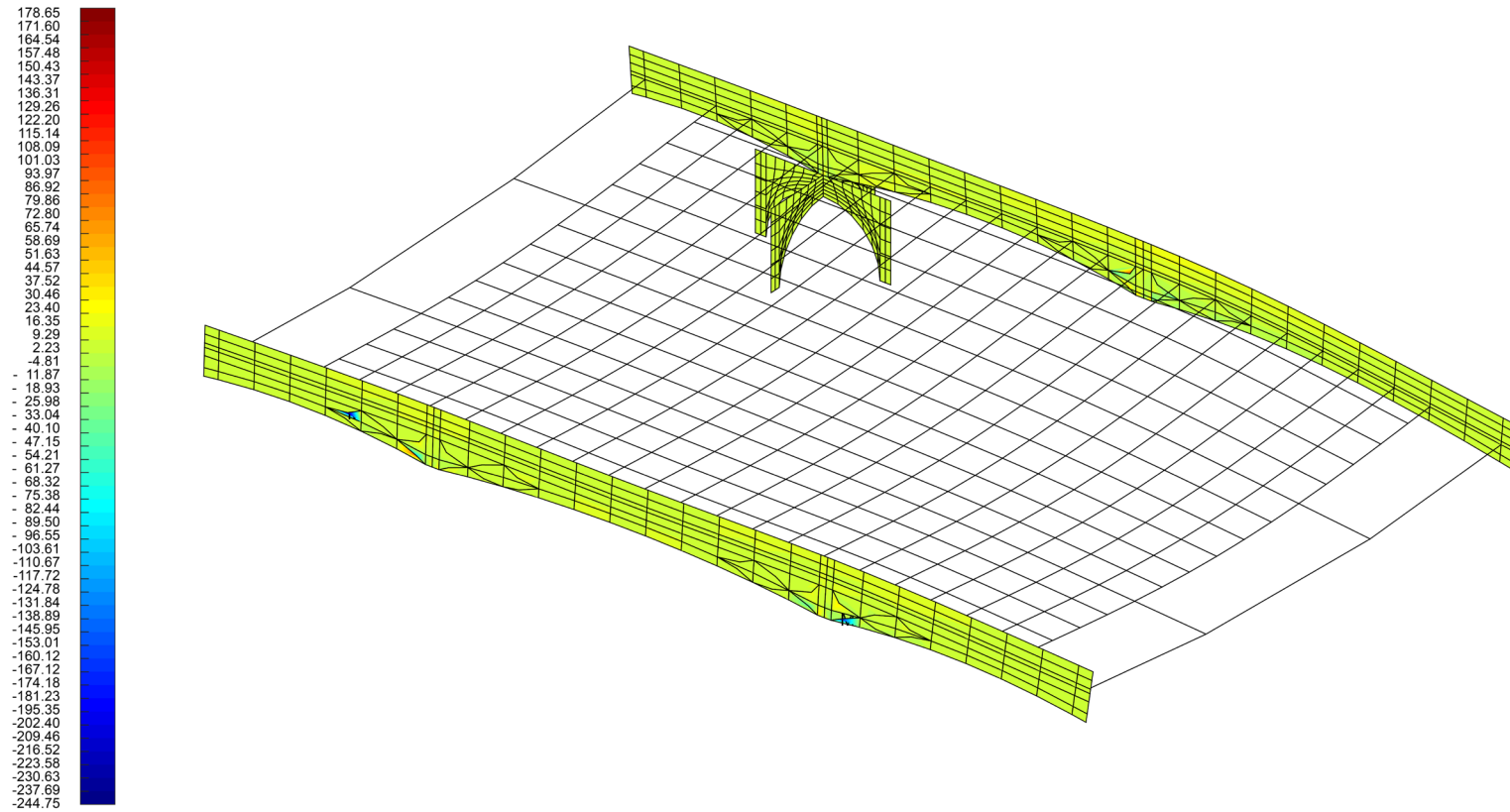


Figura 3.170. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de fuerza modal "sjx".

Vista general

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



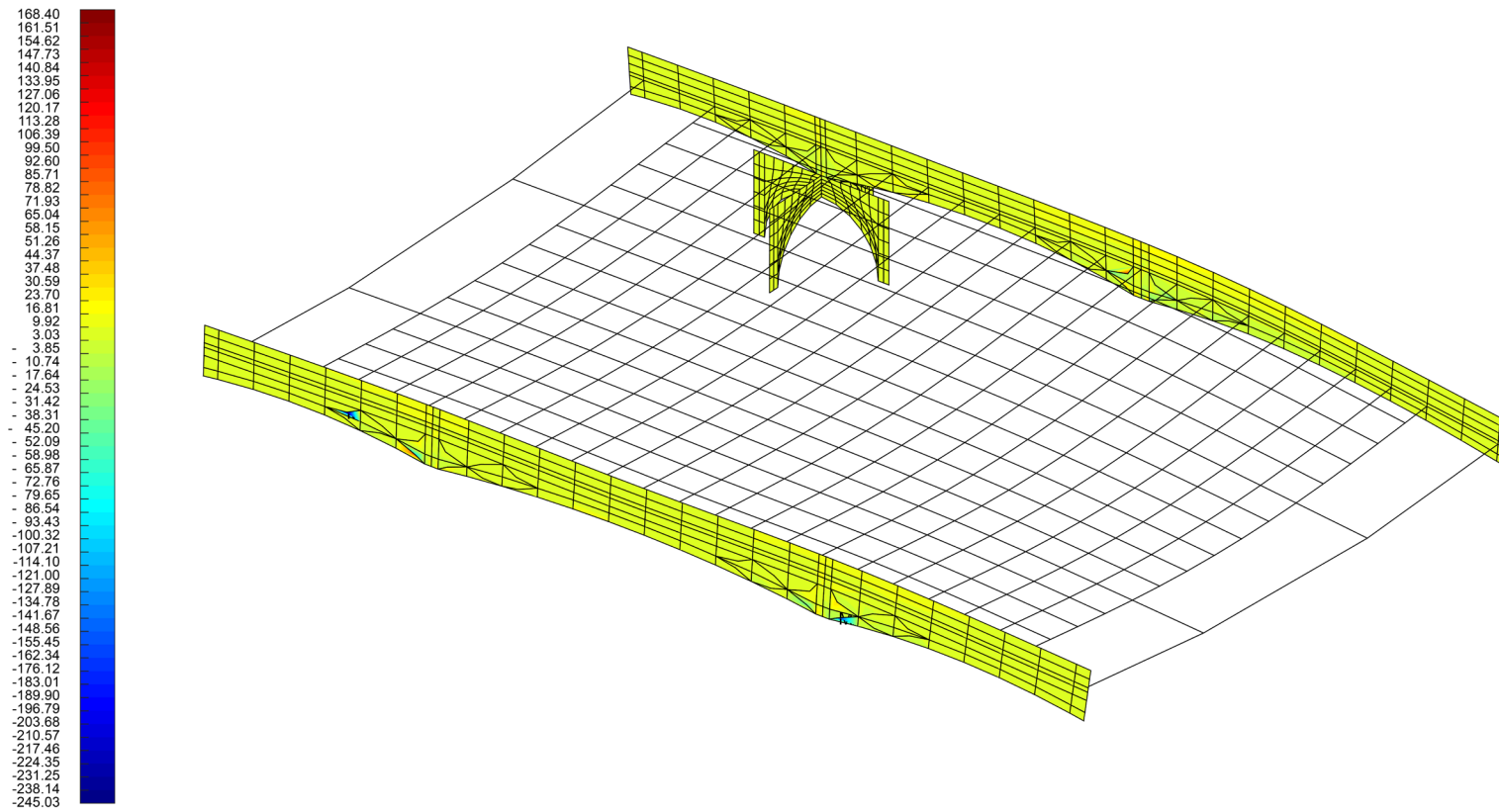


Figura 3.171. Esfuerzo normal "sx" (MPa) en función de fuerza modal "sjy".

Vista general

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

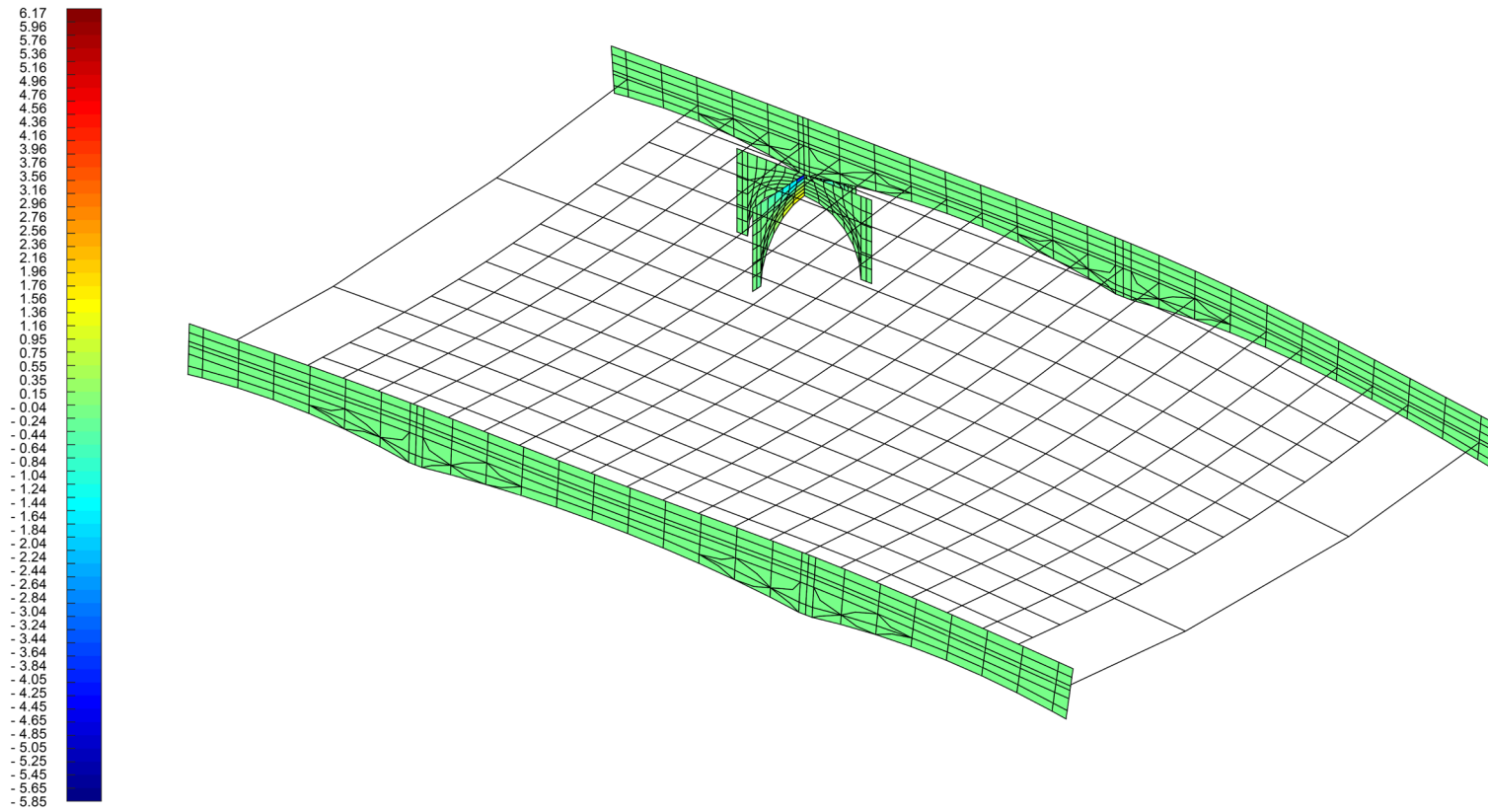


Figura 3.172. Esfuerzo normal " σ_y " (MPa) en función de fuerza modal " F_{sjx} ".

Vista general

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



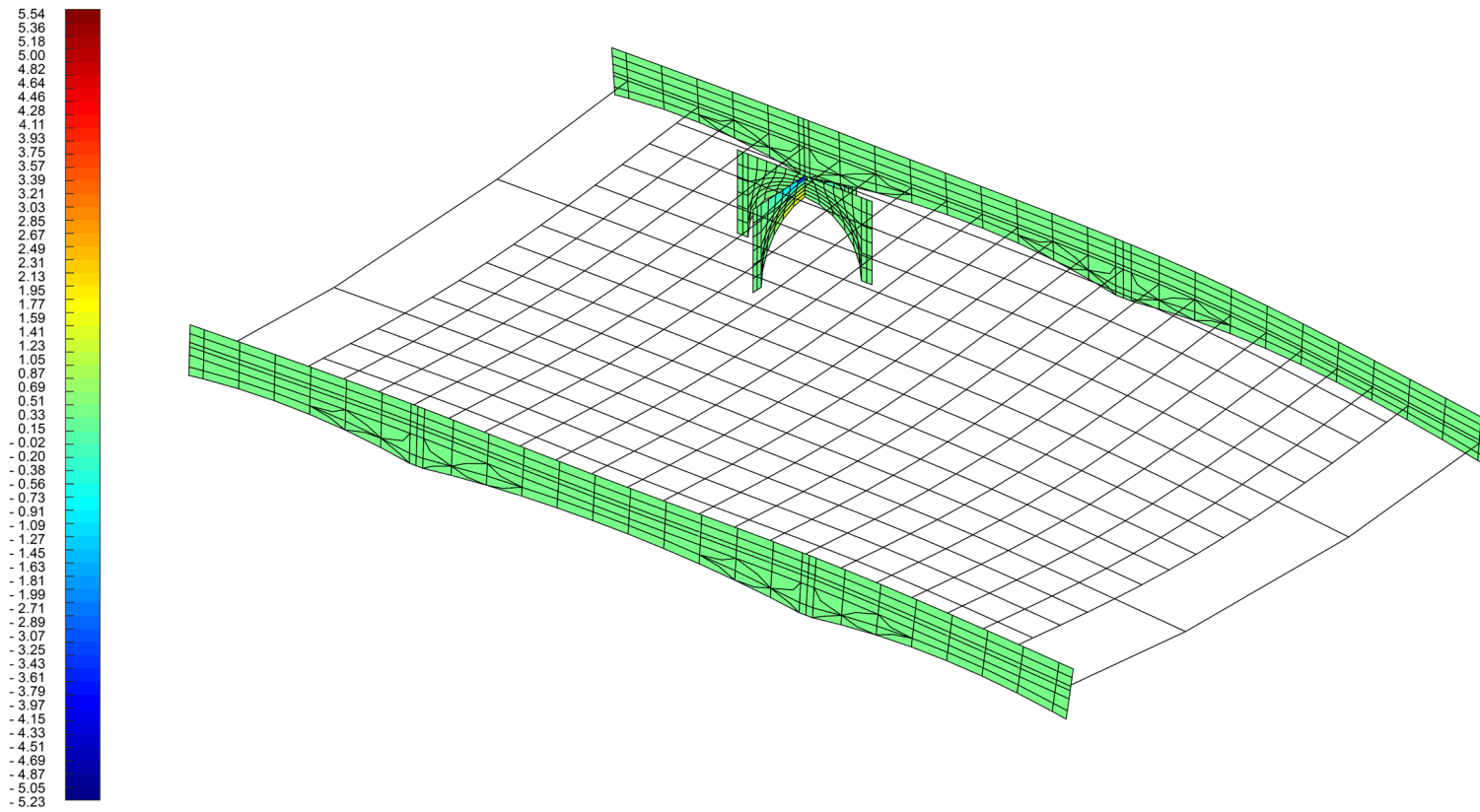


Figura 3.173. Esfuerzo normal “sy” (MPa) en función de fuerza modal “sjy”.

Vista general

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

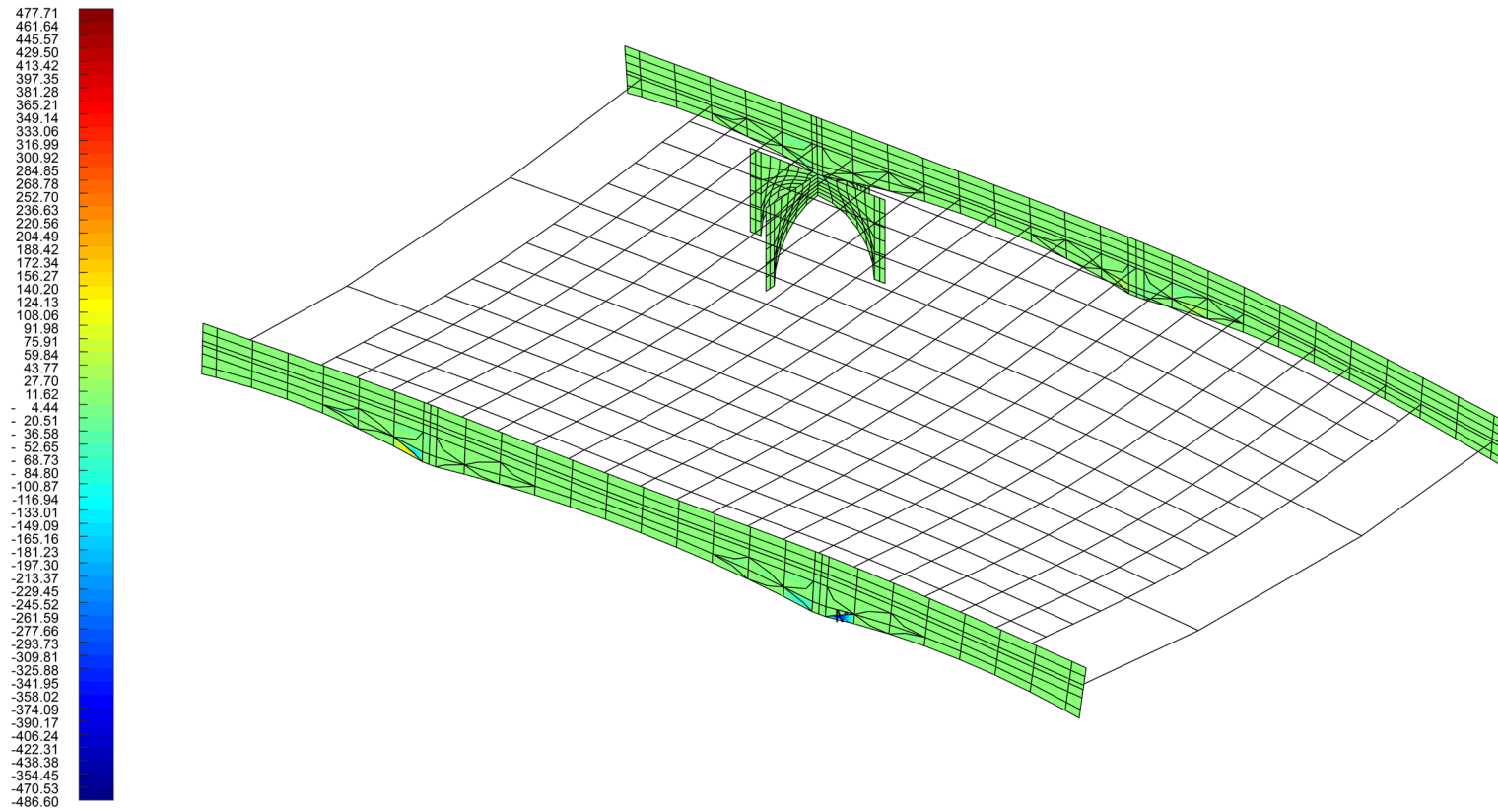


Figura 3.174. Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjx".

Vista general

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0



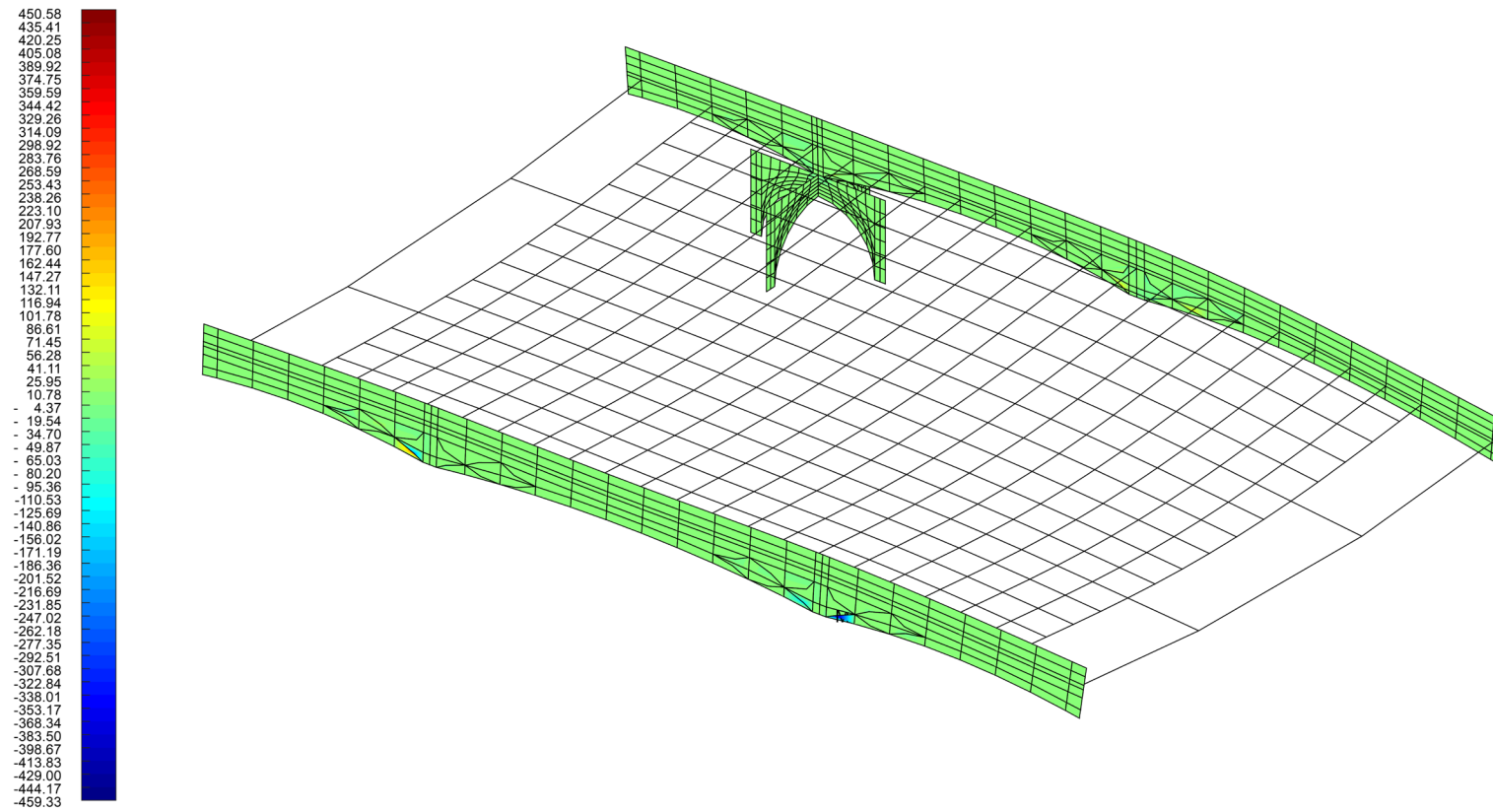


Figura 3.175. Esfuerzo normal "sz" (MPa) en función de fuerza modal "sjy".

Vista general

Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

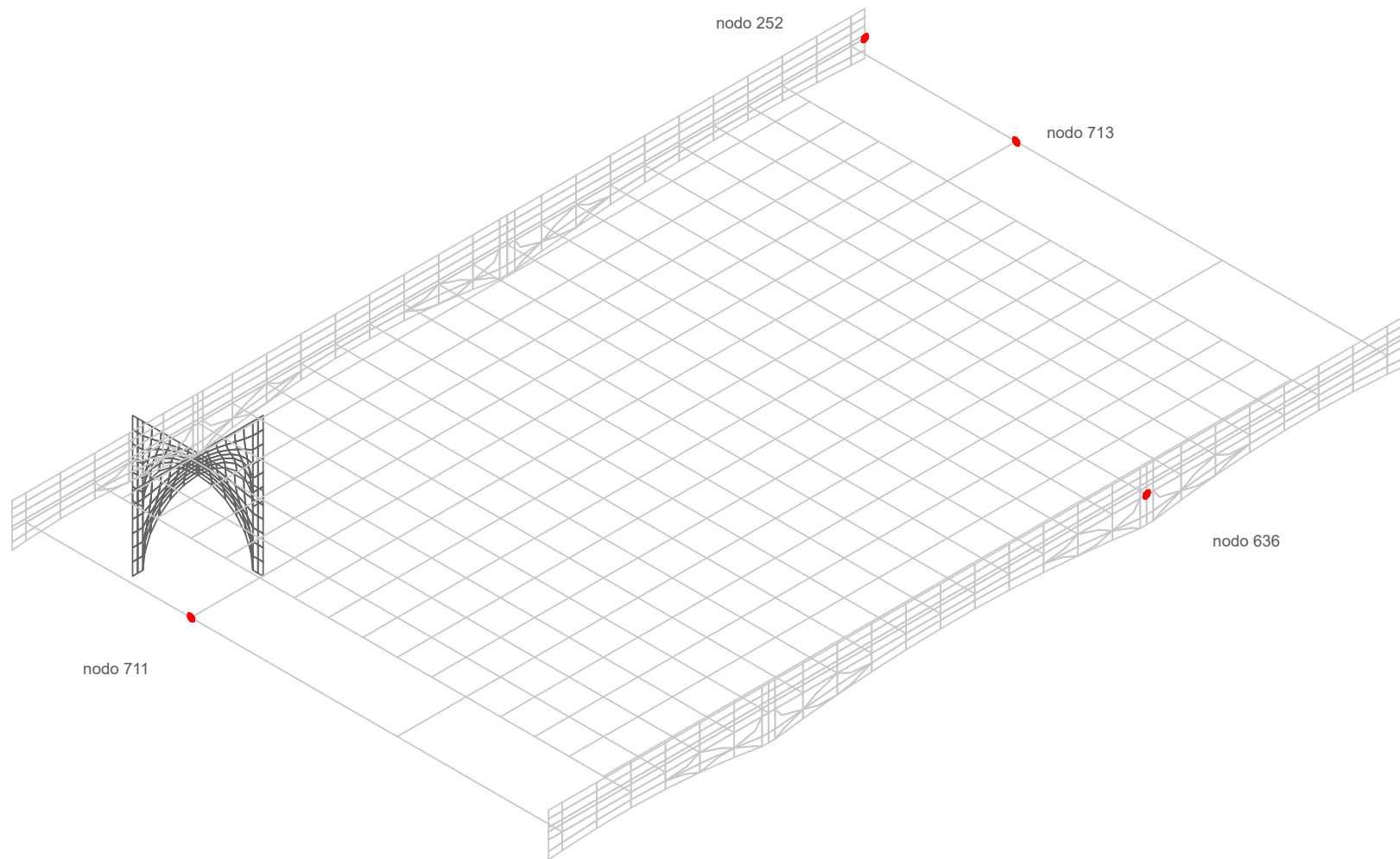


Figura 3.176. Nodos de la losa de cubierta que presentan mayores desplazamientos para el calculo de la deriva del Pabellón de Brasil en Osaka. Esc 1:125
Elaboración: Dibujo del autor a partir de StaBIL 3.0

3.4.3.5 Síntesis de la forma

La idea de “planta libre” se soluciona a partir de las vigas sinuosas que son arriostradas por una estructura de “retícula de vigas” de la cubierta. Sin embargo, debido a la disposición asimétrica de los soportes, no es posible hablar del pórtico como mecanismo de transmisión de cargas en el eje “Y”; pero donde sí se advierte este mecanismo es en cada viga sinuosa (pórtico “P1-P2” y pórtico “P3-P4”), en forma de pórtico biarticulado, habiendo de este modo la transmisión de cargas en los bordes longitudinales.

La conformación de la retícula de vigas de la cubierta surge a partir del efecto que quiere el arquitecto transmitir para iluminar, y a través de este mecanismo, caracterizar también los accesos. De este modo, aparece un nuevo módulo estructural, situado en los extremos y que funciona como viga de amarre, y que se vincula a la retícula de vigas de la cubierta a partir de la prolongación de las vigas centrales longitudinales. En función de los dos primeros modos de vibrar, se expone la importancia de este elemento en el comportamiento de la estructura, que transmite fuerzas hacia la otra viga.

El manejo de la asimetría en la cubierta se justifica a partir del sistema constructivo que a su vez da solución a la problemática de iluminación planteada por el arquitecto. De este modo, el desfase de los pilares con respecto al eje “Y”, ocurre a partir del módulo de la retícula (2 metros).

El cálculo de la deriva indica que, los desplazamientos máximos no conllevan peligro para la estructura. Así también, los esfuerzos normales de las vigas sinuosas

informan que, se advierten esfuerzos puntuales en “sx” por “sjx”, “sx” por “sjy”, “sz” por “sjx” y “sz” por “sjy”—principalmente en las bases donde se encuentran con los tres soportes ocultos—que superan la resistencia del hormigón de 29,43 MPa, y pudieron ocasionar fisuras.

El efecto de torsión que aparece producto de la asimetría de la estructura, se compensa al colocar elementos de soporte de dimensiones considerables para aumentar su rigidez. Con respecto al pilar de arcos cruzados, la distribución de esfuerzos no es uniforme, y en él, se observa como la forma circular distribuye los esfuerzos para que sean los esfuerzos a compresión los predominantes.

“Diálogo”: el sistema constructivo empleado da cuenta de la colaboración entre arquitecto e ingeniero al haber considerado el riesgo sísmico que conlleva implantar una obra en Osaka, lo que se tradujo en una solución en dos cuerpos, de modo tal que, la solución permita el libre movimiento en “X” y “Y”. El trabajo conjunto sostenido con el ingeniero, permite entender que se haya experimentado en el proceso de diseño elementos como el pilar visible, donde existe una correspondencia entre lo arquitectónico y estructural.

3.5 CONCLUSIONES

Analizadas estas obras del *Brutalismo Paulista*, se advierte que “las nociones de gravedad y fuerza son los medios para unir el desempeño mecánico con las preocupaciones estéticas y sociales” (Borgonovi e Silva & Kotnik, 2013) tanto en la obra de Vilanova Artigas como en la de Mendes da Rocha. De este modo, para los arquitectos, la fuerza de la gravedad, genera forma. Pero esta forma tiene además que cumplir otros criterios como el de distribuir y conectar los distintos espacios del programa arquitectónico. A partir de esta premisa es posible entender el diseño estructural en el *Brutalismo Paulista* como herramienta, que busca la evolución de la forma arquitectónica hacia la categoría de forma estructural, que encierra tanto el aspecto histórico—del cual existe un fuerte arraigo y referencia—así como los esfuerzos propios de la estructura a partir de principios estructurales.

La experimentación de la forma—posible a partir de la propiedad plástica del hormigón—en las obras analizadas se percibe incluso a partir de ideas iniciales o láminas de anteproyecto, en las que se percibe el interés de los arquitectos en destacar a la estructura como cualidad propia de la arquitectura, lo que da cuenta de un pensamiento técnico—que combina el pensamiento artístico y científico. La medida en la que el aspecto estructural permeó el pensamiento de los arquitectos a través de sus obras, se expone a través del análisis modal y de esfuerzos obtenidos mediante el Método de Elementos Finitos, a partir de los cuales se realiza una lectura de la forma entendida no solo partir del punto de vista arquitectónico, sino desde el punto de vista estructural al determinar su eficiencia e importancia en la estructura general.

En relación al desarrollo de la forma estructural, se ha descartado el “monólogo” como posible relación de trabajo, debido a que es evidente que existe el conocimiento por parte del arquitecto respecto al funcionamiento de la estructura a partir de las unidades estructurales empleadas—uso del pórtico—y no se registran cambios sustanciales de la forma respecto a etapas iniciales de diseño. Si se hubiese tratado de un “monólogo” la forma simplemente no pertenecería a la categoría de “estructural” pues ésta solo puede surgir si se manejan conceptos estructurales como fuerzas, momentos, deformaciones y desplazamientos.

A partir de los estudios de caso analizados, es posible entender la complejidad del pensamiento de los arquitectos respecto a la forma arquitectónica-estructural, a partir de la unidad estructural empleada para su solución. De este modo, se avizora una evolución del pensamiento técnico en el tiempo de lo que constituye el *Brutalismo Paulista* en su periodo de mayor producción.

La concepción del pórtico como unidad estructural considera el programa arquitectónico para la definición de una tipología, según la cual, se disponen el resto de unidades. Es según la tipología y su disposición en el espacio, que se comprende su arriostramiento. Sin embargo, esta acción que garantiza la estabilidad, debe entenderse como parte del desarrollo de la forma arquitectónico-estructural que tiene su origen y fin en el pórtico que transmite la carga hacia las fundaciones. De esta manera, es vista la obra arquitectónica en su totalidad, a partir de todos los elementos arquitectónicos para entender la complejidad del pensamiento de los arquitectos.

En el caso del Gimnasio de Itanhaém, la distancia entre los soportes de los extremos del pórtico necesita de un apoyo intermedio—que da a lugar al pórtico de dos vanos—, y a partir del cual la se requiere una densa red de vigas de arriostramiento que estructuren los vanos de cada pórtico y sus pórticos sucesivos. En esta obra es claro el valor arquitectónico de los pórticos, aunque los elementos empleados para su arriostramiento carecen de esta cualidad, dada su rol complementario en relación a los pórticos.

La disposición de los pilares intermedios como se explica previamente, parece haber surgido a partir del diálogo entre el arquitecto y el ingeniero, sin embargo, esta relación pudo haber sido más fructífera si se hubiese radicalizado, es decir, si el eje central estaba constituido únicamente por pilares rotados, luego de haber sido constatado en el análisis modal, que esta disposición del pilar cumple el rol de rigidizar la estructura.

Adicionalmente, si se entiende al diagrama de momentos como método para generación de forma, esto únicamente se corresponde a los pilares periféricos. Es a partir de la figura de estos que se plantea una similar en los pilares centrales, mas no a partir de un diagrama de momentos, por lo que no puede hablarse de un método empleado para plantear formas.

Si bien la tipología del pórtico en volado—como aquel empleado en la Casa en Butantã—hubiese simplificado el arriostramiento entre pórticos, la decantación del arquitecto por el pórtico de dos vanos obedece a aspectos arquitectónicos como el programa y ambientales como la iluminación. Sin embargo, lo discutible de las formas que se plantean

es el procedimiento a partir del cual se justifica su forma, que consiste en la extrapolación del diagrama de momentos como figura, y que no se justifica a nivel estructural, ya que, de acuerdo al análisis de esfuerzos, los esfuerzos mayores se concentran en la parte baja donde la sección del elemento es mayor y al contrario los esfuerzos menores en gran parte de la “aleta” del pilar. Si bien estos elementos presentan un correcto funcionamiento, es porque el cálculo estructural avaló estas formas, sin embargo, el análisis de esfuerzos muestra que no se trata de una forma adecuada en términos estructurales, por lo que es posible afirmar que la forma surge aquí a partir de un criterio arquitectónico de diseño.

Mientras tanto, en la Casa en Butantã, llama la atención el procedimiento seguido para la construcción de un modelo hiperestático—que distribuye fuerzas a todos los elementos, lo que permite jugar con delicadas piezas a partir de sus espesores—a partir de la adopción de un modelo isostático. El conocimiento del modelo isostático interesa a partir de la posibilidad de racionalizar el sistema, para el planteamiento de una losa que trabaje en una sola dirección, decisión que es sinónimo de economía de recursos, al evitar el arriostramiento en el sentido opuesto.

Pero en este caso la racionalización del sistema no se concreta con la construcción del modelo isostático, sino a través del modelo hiperestático. Esta decisión obedece a la idea de levedad y esbeltez que se persigue, a partir de la cual se piensan los planos horizontales, y que, de haber sido prefabricados—respondiendo al modelo isostático—hubiesen aumentado significativamente el peralte de los elementos que conforman las losas. Es precisamente a partir de las losas en los análisis de

esfuerzos que, se observa como al criterio de simetría (losa de cubierta) se corresponde una distribución de esfuerzos más eficiente respecto a un esquema asimétrico (losa de entrepiso).

Se advierte en su ejecución como monolito, una evolución respecto a la obra de Vilanova Artigas, porque todas las piezas que se articulan a nivel estructural, cumplen un rol arquitectónico, de manera que la solución siempre considera a los elementos desde estas dos perspectivas, y no se introducen como elementos únicamente estructurales que justifican la presencia de elementos arquitectónicos como ocurren en el arriostramiento en relación al pórtico del Gimnasio en Itanhaém.

La simpleza en el diseño y planteamiento de la obra permite observar cómo a partir de una idea fundamental la forma estructural emerge y la inclusión y disposición de cada elemento se justifica. De este modo, para llevar a cabo la idea de “concentrar cargas”, se piensa en una tipología de pórtico que disminuya la distancia entre columnas y de este modo se dispone una nueva unidad estructural para configurar el núcleo que busca “concentrar cargas”. Además, a partir de la idea de “libre movimiento”—con la que fue concebida la losa de entrepiso—se entiende la decisión de no prolongar los paños de hormigón hasta la losa de entrepiso, lo cual hubiese alterado el comportamiento de la estructura, contraponiéndose a la independencia estructural que implica la idea.

La tipología de pórtico utilizada en la vivienda—que considera la prolongación de la viga en ambos sentidos—implica una disminución del momento entre columnas al transferirlo hacia los volados. A partir de

esta lectura, se justifica a nivel estructural el empleo y ubicación de los grandes paños de hormigón, que a primera vista no cumplen un rol estructural evidente como un soporte, pero que inciden en la estructura al ejercer fuerza sobre cada uno de los volados.

De este modo, es posible prescindir de un pilar intermedio, contrario lo que ocurre en el Gimnasio en Itanhaém, decisión que obedece al criterio arquitectónico de “planta libre”. En relación al arriostramiento, es evidente que en esta obra la idea de módulo que maneja el autor desde la etapa de diseño, trasciende lo estructural hacia lo arquitectónico, al permitir plantear como solución la iluminación cenital; en este sentido se da un paso al frente, al otorgar un rol arquitectónico a elementos aparentemente secundarios en el proceso de diseño y que suelen pensarse desde su función estructural únicamente.

En el estudio de caso final correspondiente al Pabellón de Brasil en Osaka, todos los elementos cumplen una función arquitectónica y estructural. En relación a la cubierta del pabellón, la red de vigas que se anclan a las vigas sinuosas tiene valor arquitectónico, ya que permite llevar a cabo la idea de iluminación fragmentada. Si bien a partir de la tipología de viga planteada no se advierte la eficiencia a partir de la forma, se ha pensado como complementarias e imprescindibles, vigas transversales que a la vez que sirve de arriostramiento, permiten configurar la forma de los casetones tronco piramidales.

En el caso de la forma de las vigas sinuosas y el pilar visible, la forma arquitectónica que surge a partir de aspectos simbólicos posee además cualidades estructurales, como es el conocimiento del arquitecto

respecto a su eficiencia—observada a partir del análisis de esfuerzos.

En relación a la unidad estructural utilizada, ésta surge a partir de dos factores que determinaron la ubicación y tipo de pórtico que finalmente se empleó. Primero, la zona sísmica donde se emplazó el pabellón, impulsó al arquitecto a pensar la estructura por partes, siendo necesario de este modo, la incorporación de una articulación de tipo elastómero, que define al pórtico como articulado; y, además, la disposición asimétrica de los pilares, que implica la desestabilización de un esquema rígido como el simétrico—al desfazar el eje de los soportes. Esto conduce a la aparición del pórtico, únicamente a partir de cada viga sinuosa y los soportes sobre los que se asienta.

La consideración del aspecto sísmico constituye un factor fundamental para que haya existido experimentación en el uso de un nuevo sistema constructivo, a partir del cual también emerge un modelo tectónico que precisa de uniones articuladas entre sus partes. Sin embargo, el avance tecnológico de la época en Japón fue el que permitió ejecutar el sistema constructivo de la cubierta sin que sea necesario recurrir a un sistema prefabricado, que hubiese aumentado el peralte y con ello no permitido transmitir su idea de levedad, conflicto que se presenta también en la Casa en Butantã.

En los tres ejemplos se observa cómo mientras más sencillo es el arreglo de elementos que conforman la estructura—surgida a partir de la tipología de pórtico—más factible es designar cualidades arquitectónicas a los mismos. En este sentido, el pabellón presenta una evolución respecto al gimnasio, donde la unidad estructural empleada no reduce a los demás

elementos a una función únicamente estructural, sino los potencia como arquitectónicos también. De este modo, la experimentación de forma no sólo se limita a la inspección de un elemento, sino la forma debe ser comprendida en su totalidad a partir de la riqueza vista a partir de la disposición o juego de los elementos a partir de criterios estructurales.

De este modo, se observa como esta producción del *Brutalismo Paulista* tiende a la búsqueda de tipologías estructurales elementales similares a las tipologías trabajadas por autores como Le Roy o Durand, con lo que es evidente que existe una mirada hacia al pasado para proyectar que se encuentra respaldada por criterios estructurales y conocimiento técnico, cada vez menos incorporados pues el aspecto estructural es visto simplemente como una herramienta que permite materializar ideas fantasiosas del arquitecto, cuando esta debe ser incorporada al proceso que justifica el diseño. La simetría, que constituye un rasgo característico de las tipologías, debe ser valorado no solo a partir de su cualidad arquitectónica de organizador del espacio, sino como un esquema de adecuado funcionamiento estructural, observado a partir de los análisis de esfuerzos y modales en el Gimnasio de Itanhaém y la Casa en Butantã, por lo que la inestabilidad visual que introduce la simetría a nivel arquitectónico, se corresponde también a una inestabilidad a nivel estructural.

El aporte del *Brutalismo Paulista*, respecto a cómo se venía utilizando la estructura en el movimiento moderno, radica en el valor pedagógico que se le confiere, al expresar ésta cómo fue construida y cómo trabaja como sistema estructural, a la vez que soluciona aspectos arquitectónicos. Bajo esta definición, el

Brutalismo Paulista se muestra como un camino a seguir, en el que la obra arquitectónica constituye un objeto de enseñanza, a partir del cual, estudiantes y arquitectos infieren fundamentos teóricos del diseño estructural, cuyo análisis más minucioso se pueda apoyar en programas computarizados para establecer un juicio crítico de la eficiencia de las formas.

3.6 RECOMENDACIONES

A partir de los estudios de caso en los que se expone la importancia de la relación entre arquitectura e ingeniería, es evidente que herramientas como *MATLAB* contribuirían a que el proceso de diseño de formas experimentales se alimente de información obtenida a partir de los análisis de esfuerzos y modales que requieren de conceptos básicos estructurales para su interpretación, de manera tal que, se pueda desarrollar en el arquitecto una sensibilidad que le permitan acercarse a un diseño intuitivo de la forma bajo los conocimientos de la estructura que permitan una nueva aproximación a la arquitectura.

Muchas de las lecturas o interpretaciones aquí expuestas en relación al desarrollo de la forma estructural ocurren a partir de escasa información encontrada y otras deducidas a partir de la vertiente histórico-arquitectónica que se aborda, por lo que resulta aconsejable visitar personalmente los archivos históricos en Brasil y Japón, tal y como fue indicado por diferentes fuentes a las que se solicitó información.

Futuros aportes que contribuyan respecto al análisis realizado en el presente, podrían considerar un estudio comparativo a partir de modelos originales compuestos en su totalidad por elementos bidimensionales y

modelos racionalistas que simplifiquen los elementos arquitectónico-estructurales distintivos de cada obra como pilares, paños de hormigón y vigas; comparación que deberá considerar claro está, criterios del *Brutalismo Paulista* como los expresados en el abecedario de Verde Zein.

Referencias bibliográficas

A

Abdelmawla, S., Elnimeir M., & Krawczyk, R. (2000). Structural Gizmos. *ACADIA 2000: Eternity, Infinity and Virtuality*. 115-121.

Abe, H. A. (2009). *TRÊS CASAS BUTANTÃ*. (Tesis de pregrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.

ABNT NB-1. Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado, Rio de Janeiro, Brasil, 1960. Cortesía de: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Acta nº 1689. DELIBERAÇÕES DO COLEGIADO EM SESSÃO ORDINÁRIA, São Paulo, Brasil, 1 de diciembre de 2012.

Addis, B. (2007). *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. Londres: Phaidon Press.

Alves, A. A. de A. (2007). Cinquenta anos depois: a atuação do Ipesp e dos arquitetos modernos paulistas na construção de edifícios escolares em São Paulo de 1959 – 1962: caracterização das condições atuais de conservação e preservação a partir da análise de exemplares selecionados. *Anais do 7 seminário docomomo Brasil*, 40. Recuperado de: <https://docomomo.org.br/wp-content/uploads/2016/01/053.pdf>

Alves, A. A. de A. (2008). *Arquitetura escolar paulista 1959 - 1962: O PAGE, o IPESP e os arquitetos modernos paulistas*. (Tesis de doctorado). Universidade de São Paulo, São Paulo. doi: <https://doi.org/10.11606/T.16.2008.tde-29032010-111636>

Amaral, A. (2019). *Comunicación personal con Pedro*

Esteban Astudillo Sacoto. [Correo electrónico].

Amaral, I. (2010). *Tensions tectoniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967-2005)*. (Tesis de doctorado). Université de Montréal, Montréal.

Ambrose, J., & Tripeny, P. (2016). *Simplified Engineering For Architects And Builders* (12. Ed). Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

Aristóteles. (Siglo IV a.C.). *Física*.

Artigas, J. B. V. (1967). O “DESENHO”. *ARTIGAS*. Brasil, São Paulo: CEB-GFAU.

Artigas, J. B. V. (1970). Sobre escolas. *Revista Acrópole*. (377), 13-18. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/377>

Artigas, J. B. V. (1999). *Caminhos da arquitetura (Apresentação a cargo de Carlos Lemos)* (3. Ed). São Paulo, Brasil: Cosac & Naify Edições.

Athanasopoulos, V., & Kenchian, A. (2017). CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E PROJETO ARQUITETÔNICO DO BRUTALISMO PAULISTA DA DÉCADA DE 1960. *REGRASP*. 2(1), 55-75.

B

Baffi, M. (2015). Os inventários sistemáticos do DPH e o convênio escolar: a arquitetura moderna a serviço do ensino público. *InSitu – Revista Científica do Programa de Mestrado Profissional em Projeto, Produção e Gestão do Espaço Urbano*, 1(1), 32-42. Recuperado

de: <http://www.revistaseletronicas.fiamfaam.br/index.php/situs/article/view/306/321>

Bandyopadhyay, S. (s.f.). *The Concept of Degrees of Freedom*. (Departamento de Ingeniería de Diseño). Indian Institute of Technology Madras, Chennai. 7.

Bathe, K.-J. (2014). *Finite element procedures* (2. Ed). Watertown, Massachusetts: Prentice-Hall, Pearson Education, Inc.

Baumberger, C. (2011). Structural Concepts and Spatial Design: On the Relationship Between Architect and Engineer. En A. Flury (Ed.), *Cooperation: The Engineer and the Architect*. DE GRUYTER. doi: <https://doi.org/10.1515/9783034610551.57>

Baurmann, H., Dilling, J., Euler, C., Niederwöhrmeier, J., & Niederwöhrmeier, J. (2013). *Support i materialise: Columns, walls, floors*. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/ucuenca-ebooks/detail.action?docID=1121637>

Bender, R. (1976, Junio). The teaching of structural design. Association of Collegiate Schools of Architecture [ACSA Memo]. Reimpreso y citado por Black, R. G., & Duff, S. (1994). A model for teaching structures: Finite element analysis in architecture education. *Journal of Architecture Education*, 48(1): 38-55.

Bernabeu Larena, A. (2007). *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Black, R. G., & Duff, S. (1994). A Model for Teaching

Structures: Finite Element Analysis in Architectural Education. *Journal of Architectural Education*, 48(1), 38-55. doi: <https://doi.org/10.1080/10464883.1994.10734621>

Blake, P. (1996). *Master Builders: Le Corbusier, Mies van der Rohe, and Frank Lloyd Wright*. WW Norton & Co. Nueva York.

Blinder, S. M. (2013). Capítulo 12—Vector Analysis. En S. M. Blinder (Ed.), *Guide to Essential Math (Second Edition)* (pp. 199-226). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407163-6.00012-6>

Borgonovi e Silva, L., & Kotnik, T. (2013). Confrontation between building and ground: notions of force and gravity in the work of João Vilanova Artigas. En P. J. D. da Souza Cruz (Ed.), *Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges* (pp. 1836-1843). Londres: Taylor & Francis Group.

Boyken, I., & Oestmann, H. J. (1990). Ludwig Mies van der Rohe and Egon Eiermann: The Dictate of Order. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 49(2), 133-153. <https://doi.org/10.2307/990473>

Bruand, Y. (1998). *Arquitetura Contemporânea no Brasil*. Perspectiva: São Paulo.

Bucci, Â. (1998). *Anhangabaú, o Chá e a metrópole*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo.

C

Cache, B. (2000). Digital Semper. En C.C. Davidson

(Ed.), *Anymore (Anymore Conference, París, 23-35 Junio 1999)*. Cambridge MA-Londres: MIT Press.

Cacho-Pérez, M., Frechilla, N., & Lorenzana, A. (2017). Estimación de las masas modales de una estructura en servicio mediante transformación en el espacio de estados. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 33(1), 123-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2016.02.002>

Campo Baeza, A. (2003). De la cueva a la cabaña; De lo estereotómico y tectónico en la arquitectura. En "Sustancia y circunstancia: memoria del curso 2002-2003 de las asignaturas proyectos arquitectónicos 4 y 5". Madrid: Marea Libros.

Carpinteri, A. (1997). *Structural mechanics: A unified approach* (1. Ed), Oxon, Inglaterra: Taylor & Francis Group.

Carrasco, M. I., & Llerena, A. G., (2010). *ESTUDIO DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE SÃO PAULO, ANTEPROYECTO PARA LA FACULTAD DE ARTES DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca.

Carter, A., Kirkegaard, P. H., & Tyrell, R. (2013b). The nature of tectonic architecture and structural design. En P.J. da Souza Cruz (Ed.), *Structures and architecture: New concepts, applications and challenges* (pp.237-244). Londres: Taylor & Francis Group.

Carter, P. (1974). *Mies van der Rohe at work*. Pall Mall Press, Londres.

Castello, I., Frank, M., & Spinelli, D. (2016). *MONOGRAFÍA DE PAULO MENDES DA ROCHA*. (Departamento de Construcciones, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura). Universidad Nacional de Rosario, Rosario. 8.

CBH-BS – Comitê da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista. RELATÓRIO DE SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DA BAIXADA SANTISTA - UGRHI 7. São Paulo, Brasil, 1999. Recuperado de <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/6530/geologicoseg.pdf>

Cervilla García, A. (2015). *El lenguaje de la estructura: Mies van der Rohe y la construcción con acero y hormigón*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Chambers, W. (1862). *A Treatise On The Decorative Part Of Civil Architecture*. Kelly and Co., Londres.

Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4. Ed). Upper Saddle River, Nueva Jersey: Prentice Hall.

Cisneros Ramos, P. A. (2008). *Paulo Mendes da Rocha: la estructura en la concepción del proyecto, dos ejemplos del Club Atlético Paulistano (Sao Paulo, SP 1958). Almacenes forma (Sao Paulo, SP 1987)*. (Tesis de maestría). Universidad de Cuenca, Cuenca.

Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures* (3. Ed). Berkeley, California: Computers & Structures, Inc.



Corres Álvarez, E. (2002). Proyecto Dom-ino: el sistema estructural. *Massilia: Anuario de Estudios Lecorbuserianos*, 13. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2099/2602>

Costa, J. B. (2010). *Ver não é só ver: dois estudos a partir de Flavio Motta*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo. doi: <https://doi.org/10.11606/D.16.2010.tde-09062010-102456>

Costa, P. (2015). O CONCRETO IDEOLÓGICO DE PAULO MENDES DA ROCHA – AS CASAS DO BUTANTA. Recuperado 18 de junio de 2020, de http://obviousmag.org/nova_onda/2015/o-concreto-ideologico-de-paulo-mendes-da-rocha-as-casas-do-butanta.html

D

Dambacher, K., Elsener, C. & Leuthold, D. (2005). *The skill of masonry. En Constructing architecture: Materials, processes, structures, a handbook* (pp.43-55). Basilea: Birkhäuser-Publishers for Architecture.

Dantas, A. D. (2010). *Os pavilhões brasileiros nas exposições internacionais*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo. doi: <https://doi.org/10.11606/D.16.2010.tde-15062010-102841>

Dedecca, P. G. (2012). A idéia de uma identidade paulista na historiografia de arquitetura brasileira. *Pós. Revista Do Programa De Pós-Graduação Em Arquitetura E Urbanismo Da FAUUSP*, 19(32), 90-101. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v19i32p90-101>

Deplazes, A. (Ed.). (2005). *Constructing architecture: Materials, processes, structures, a handbook*. Birkhäuser-Publishers for Architecture. Basilea.
Dessauer, F., (1927). *Philophie der Technik*. F. Cohen. Bonn.

Dooms, D. et al. (2014). *Stabil: A FINITE ELEMENT TOOLBOX FOR MATLAB. VERSION 3.0. USER'S GUIDE*. Leuven. Cortesía de: Ing. Hernán García.

Dooley, S., (2004). *The development of material-adapted structural form*. (Tesis de doctorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausana.

Døssing, O., & Brüel & Kjær (Firm) (1988). *Structural Testing: Modal analysis and simulation*. Brüel & Kjær. Recuperado de: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Primers/br0507.ashx>

Durand, J-N-L. (1801). *Recueil et Parallèle des edifices en tout genre, anciens et modernes*.

Durand, J-N-L. (1821). *Partie graphique des cours d'architecture faits a l'École Royale Polytechnique depuis sa réorganisation*.

Durand, J-N-L. (2000). *Précis of the Lectures on Architecture*. Getty Research Institute, Los Angeles.

E

Editorial Acrópole. (1967). Acrópole. São Paulo: n.342, p.14a-14c, ago. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/342>

Editorial Acrópole. (1969). Acrópole. São Paulo: n.361,

p.13-27, may. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/361>

Editorial Acrópole. (1970). Acrópole. São Paulo: n.377, p.11-13, sep. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/377>

Engel, H. (2001). *Sistemas de estruturas*. Sistemas estruturais. Gustavo Gili. Barcelona.

F

Farinati, A., Bonfim, A. C., Cristófaró. G., & Verlangeiro, M. (2016). *brutal(ismo)*. (Arquitectura do Brasil Contemporânea. Professora Amanda Casé). Universidade de Brasília, Brasília. 62. Recuperado de https://issuu.com/giovannicristofaro/docs/revista_r02_issuu

Ferrando Bramona, J. (2014). João Vilanova Artigas, fundador de la "Escola Paulista". DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura, 30, 6-17.

Ferrata, C. A. (2008). *Escolas públicas em São Paulo (1960-1972)*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo. doi: <https://doi.org/10.11606/D.16.2008.tde-25032010-095143>

Ferraz, M. C., Puntoni, Á., Pirondi, C., Latorraca, G., & Artigas, R. (1997). *Vilanova Artigas*. Instituto Lina Bo e P. M. Bardi / Fundação Vilanova Artigas. São Paulo.

Ferreira, A. J. M. (2009). *MATLAB Codes for Finite Element Analysis: Solids and Structures*. Netherlands: Springer.

Flury, A. (2011). *Cooperation: The Engineer and the Architect*. Birkhäuser. Basilea.

Frampton, K. (1992). *Modern Architecture: A Critical History*. Thames & Hudson.

Frampton, K. (1995). *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. MIT Press.

Frampton, K. (2002). *Labour, work and architecture*. Phaidon Press. Londres; Nueva York.

G

García del Monte, J. M. (2006). *De las posibilidades arquitectónicas del pretensado: técnica y proyecto en la obra de Paulo Mendes da Rocha*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Geological Survey of Japan. (s.f.). [Mapa geológico de la Prefectura de Osaka, Japón en GeomapNavi]. Recuperado el 4 de Enero, 2020, de: <https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php#12,34.77759,135.53120>

Giannecchini, A. C. (2009). *Técnica e estética no concreto armado. Um estudo sobre os edifícios do MASP e da FAUUSP*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo.

Goudeau, J. (2015). The Matrix Regained: Reflections on the Use of the Grid in the Architectural Theories of Nicolaus Goldmann and Jean-Nicolas-Louis Durand. *Architectural Histories*, 3(1), 9. doi: <https://doi.org/10.5334/ah.cl>

Gouvêa, J. P. (2018). *Entrevista con Nio Tatewaki*. Recuperado de <https://www.axismag.jp/posts/2018/12/110570.html>

Gouvêa, J. P. (2019). *Entrevista con Pedro Esteban Astudillo Sacoto*. [Skype].

Grauer, J.A., & Hubbard, Jr., J.E. (2013). *Flight dynamics and system identification for modern feedback control*. Philadelphia, United States: Woodhead Publishing Limited. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857094674>

H

Hagedorn, P., & Spelsberg-Korspeter, G. (Ed.). (2014). *Active and passive vibration control of structures*. Udine, Italia: Springer.

Hale, L. C. (1999). Principles and techniques for designing precision machines Engineer. (Tesis de doctorado). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Hearn, E. J. (1997). *Mechanics of Materials 1. An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials* (3. Ed). Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann.

Hildebrand, F. B. (1974). *Introduction to Numerical Analysis*. Estados Unidos: McGraw-Hill.

Hildebrand, S. (2015). Towards an Expanded Concept of Form. Gottfried Semper on Ancient Projectiles. En S. Hildebrand & E. Bergmann (Ed.), *Finding, Form-Shaping, Designing Architecture: Experimental, Aesthetical, and Ethical Approaches to Form in Recent*

and Postwar Architecture (pp.131-143). Lugano: Mendrisio Academy Press / Silvana Editoriale.

Hofmann, H., & Rinke, M. (2018). *On the nature of early design collaboration of architect and structural engineer: Development of a socio-cognitive framework*. 8 p. doi: <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000318569>

I

Ishiyama, Y. (2011). *Introduction to Earthquake Engineering and Seismic Codes in the World*. 115 p.

Inojosa, L. S. P. (2010). *O Sistema Estrutural na Obra de Oscar Niemeyer*. (Tesis de maestría). Universidade de Brasília, Brasília.

J

Jacoby, S. & Lee, C. (2007). *Typological Formations: Renewable Building the City*. AA Publications, Londres.

Jacoby, S. (2013). *The Reasoning of Architecture. Type and the problem of historicity*. (Tesis de doctorado). Architectural Association. Londres.

Jacoby, S. (2015). Typal and typological reasoning: A diagrammatic practice of architecture. *The Journal of Architecture*, 20(6), 938-961. <https://doi.org/10.1080/13602365.2015.1116104>

Japan Seismic Hazard Information Station. (s.f.). [Mapas probabilísticos de riesgo sísmico por categoría de terremoto de Japón en J-SHIS Map]. Recuperado el 6 de Enero, 2020, de: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/?lang=en>



Japan Society of Civil Engineers (Ed.). (1961). *Guía para el diseño y construcción de concreto pre-esforzado* (Número 160). Japan Society of Civil Engineers.

Japan Society of Civil Engineers (Ed.). (1967). *Especificación Estándar de Concreto*. Japan Society of Civil Engineers.

Jeanneret-Gris, C-E y Jeanneret, P. (1923). *Les Cinq Points d'une Architecture Nouvelle*.

Ji, T. (2003). Concepts for designing stiffer structures. *The Structural Engineer*, 81, 36-42.

Jiménez Gómez, E. M. (2012). *El pilar en Mies van der Rohe: el léxico de l'acer*. (Tesis de doctorado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Junqueira de Camargo, M. (2019). Artigas e a Escola Paulista. *arq.Urb*, (14), 135-155. doi: <https://doi.org/10.37916/arq.urb.vi14.264>

K

Kamita, J. M. (2000). Vilanova Artigas. Cosac & Naify Edições. São Paulo.

Kamoshita, Y. (1959). *Soils in Japan. Soil Science and Plant Nutrition*, 5(2), 84-94. doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.1959.10430899>

Kim, R. (2006). *The art of building (Baukunst) of Mies van der Rohe*. (Tesis de doctorado). Georgia Institute of Technology, Georgia.

Kipnis, J. (2006). Re-originating Diagrams. En S. Cassarà. & P. Eisenman. (1. ed.), *Peter Eisenman:*

Feints (pp.193-201).

Kisacky, J. (2001). History and Science: Julien-David Leroy's «Dualistic Method of Architectural History». *Journal of the Society of Architectural Historians*, 60(3), 260-289. <https://doi.org/10.2307/991756>

Komendant, A. (2000). *Kahn/Komendant: 18 años con el arquitecto Louis I. Kahn*. COAG. La Coruña.

Kürel, E. (2016). Laugier vs Durand: Revisiting Primitive Hut in the Classical Architectural Discourse. *Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Dergisi*, 15, 111-120. <https://doi.org/10.17484/yedi.60302>

L

Lambert, P. (2001). *Mies in America*. H.N. Abrams. Nueva York.

Landau, L.D., & Lifshitz, E.M. (1970). *Theory of Elasticity. Course of theoretical thesis*, Oxford, Inglaterra: Pergamon Press.

Laugier, M-A. (1755). *Essai sur l'architecture*.

Le Corbusier. (1933), Truth From Diagrams, *Preludio*, 6

Leet, K. M. & Uang, C. M. (2005). *Fundamentals of Structural Analysis*. McGraw Hill, Londres.

Leinz, V., & Carvalho, A. M. (1957). Contribuição à Geologia da Bacia de São Paulo. *Boletim Da Faculdade De Filosofia Ciências E Letras, Universidade De São Paulo. Geologia*, (15), 5-60. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3862.bffcluspgeologia.1957.121841>

León, A. M. (2014). Designing dissent. Vilanova Artigas and the São Paulo of Architecture. En I. Weizman (1. Ed.), *Architecture and the Paradox of Dissidence* (pp.74-88). Londres; New York: Routledge, Taylor & Francis Group.

Le Roy, J-D. (1758). *Las Ruinas de los Más Bellos Monumentos de la Antigua Grecia*.

Le Roy, J-D. (1770). *Ensayo sobre la Historia de la Arquitectura*.

Leslie, T. (2002). Form as Diagram of Forces: The Equiangular Spiral in the Work of Pier Luigi Nervi. *Architecture in Communication. Challenge and opportunity in building the information age*, 465-474.

Leslie, T. (2003). Form as Diagram of Forces: The Equiangular Spiral in the Work of Pier Luigi Nervi. *Journal of Architectural Education*, 57(2), 45-54. doi: <https://doi.org/10.1162/104648803770558987>

Leupen B., Grafe C., Kornig N., Lampe M., & de Zeeuw P. (1997). *Exploring structures in architecture*. 010 Publishers, Rotterdam.

Lindner, W. & Tamms, F. (1938). *Mauerwerk*. Alfred Metzner Verlag. Berlin.

Liu, G. R., & Quek, S. S. (2014). *The Finite Element Method. A Practical Course* (2. Ed). Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann. doi: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00779-X>

Lonnman, B. (2007). *STRUCTURAL PERFORMANCE MODELING IN ARCHITECTURAL DESIGN*

Luccas, L. H. H. (2010). La arquitectura moderna brasileña en los años cincuenta: entre el modelo corbusiano-carioca en declive y las alternativas en ascenso. *Apuntes. Revista De Estudios Sobre Patrimonio Cultural*, 23(1), 32-45.

Luyten, L. (2012). *Structurally Informed Architectural Design. Proposals for a Creative Collaboration between Architect and Structural Engineer*. (Tesis de doctorado). Chalmers University of Technology, Gotemburgo.

M

Macadar, A. M. (2010). *Uma trajetória brasileira na arquitetura das exposições universais dos anos 1939-1992*. (Tesis de maestría). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Macdonald, A. (2001). *Structure and architecture* (2. Ed). Architectural Press.

Madrazo, L. (1994). Durand and the Science of Architecture. *Journal of Architectural Education*, 48(1), 12-24. doi: <https://doi.org/10.1080/10464883.1994.10734619>

Madrazo, L. (2006). *The concept of type in architecture: An inquiry into the nature of architectural form*. (Tesis de doctorado). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.

Maitland, B. (1979). The grid. *Oppositions*, 15/16, 90-117.

Marcos, C. L. (2012). ¿TIPOLOGÍAS O TOPOLOGÍAS? De las formas definidas tipológicamente en la arquitectura. *EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 17(19), 102-113. doi: <https://doi.org/10.4995/ega.2012.1362>

Marone, D. (1980). *Entrevista con José Luiz Telles*. "ARTIGAS: Da idéia ao desenho". p. 81.

Marquardt, S. (2005). *A ESTRUTURA INDEPENDENTE E A ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA*. (Tesis de maestría). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Martí Arís, C. (1993). *Las variaciones de la identidad: Ensayo sobre el tipo en arquitectura* (1. Ed). Demarcación de Barcelona del Colegio de Arquitectos de Cataluña : Ediciones del Serbal. Barcelona.

Matheson, J.A.L. (1971). *Hyperstatic structures: an introduction to the theory of statically indeterminate structures*. Butterworth.

Mayol Amengual, J. (2014). A la sombra del dolmen: acerca de la arquitectura de Paulo Mendes da Rocha. DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura, 30, 98-107.

Mendes da Rocha, P. A. (1999). De um traço nasce a arquitetura. *Arc Design*, São Paulo.

Mendes da Rocha, P. A. (2011). Entrevista a Paulo Mendes da Rocha. Diagramas de energía y fuerza. *Palimpsesto*, (3), 2-5.

Mendes da Rocha, P. (2017). La Arquitectura y

las obras. *Cuadernos De Arquitectura. Habitar El Norte*, (10), 2-7. doi: <https://doi.org/10.22199/S071985890.2006.0010.00002>

Mendes da Rocha, P. A. (2018). *Entrevista con Catherine Otundo*. Recuperado de http://cremme.com.br/wp-content/uploads/2018/05/LC_Catherine-Otundo-Paulo-Mendes-da-Rocha.pdf

Mendes da Rocha, P. A. (2018, Julio). *Entrevista con Thiago Rosenberg* [Real Media file]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=0vNrykcfijl>

Mengue, P. (26 de febrero de 2019). Prefeitura de SP tomba Paulistano e 5 obras de Paulo Mendes da Rocha. *Estadão*. Recuperado de https://saopaulo.estadao.com.br/noticias/geral,prefeitura-de-sp-tomba-paulistano-e-5-obras-de-paulo-mendes-da-rocha,70002736812?fbclid=IwAR0A8Ofh00vBdtVHg-leoRnYqTOM0hhFS3iVx5JTE0vW9ZXBF-V6A3hA0K3c&utm_medium=website&utm_source=archdaily.com.br

Meninato, P. (2015). *Sobre el Tipo como Procedimiento Proyectual*. (Tesis de doctorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Mies van der Rohe, L. (1964). *Entrevista con John Peter*. Recuperado de: <https://www.worldcat.org/title/john-peter-interviews-ludwig-mies-van-der-rohe/oclc/48680004>

Millais, M. (2017). *Building structures: Understanding the basics* (3. Ed). Routledge, Taylor & Francis Group.

Mitchell Jr, N. B. (1961). A Proposal for a Sequence of

Structure Courses. *Journal of Architectural Education*, 15(4), 29-32. doi: <https://doi.org/10.1080/10464883.1961.11102442>

Moneo, R. (1978). On Typology. *Oppositions*, 13, 22-45.

Moneo, R. (1981). Prólogo. En J-N-L. Durand (Ed.), *Compendio de lecciones de arquitectura. Parte gráfica de los cursos de arquitectura*. Madrid: Pronaos.

Montaner, J. M. (2014). Mendes da Rocha. Diagramas de energía y fuerza. *EN BLANCO. Revista de Arquitectura*, 6(15), 10-13. doi: <https://doi.org/10.4995/eb.2014.5847>

Morais, P., & Puntoni, Á. (2002). *RELATÓRIO. DIRETRIZES DE PROJETO DE REFORMA DE EDIFÍCIO DE INTERESSE HISTÓRICO. EE Jon Teodoresco / Itanhaém*. Moraes+Puntoni Arquitetura SCL. 27. Cortesía de: Arq. Apoena Amaral.

Moro, J. L. (2019). *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail: Band 1 Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57403-4>

Motta, F. (1960). Rapporto Brasile. *Zodiac*, 6, 58-59.

Motta, F. (1967). Paulo Mendes da Rocha. *Revista Acrópole*. (343), 17-18. Recuperado de: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/343>

Mueller, C., Fivet, C., & Ochsendorf, J. (2015). Graphic Statics and Interactive Optimization for Engineering Education. *Structures Congress 2015*, 2577-2589. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784479117.223>

Muñoz Miranda, A. (2011). *El uso de la técnica en la concepción arquitectónica. El espacio entre el cielo y la tierra hacia una ética tectónica*. (Tesis de doctorado). Universidad de Granada, Granada.

Muttoni, A. (2012). *L'art des structures. Une introduction au fonctionnement des structures en architecture*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Italia.

N

NEC-SE-DS (2014). Peligro Sísmico, diseño sismo resistente parte 1. Norma Ecuatoriana de la Construcción. Seguridad Estructural de las Edificaciones. Ecuador. Recuperado de: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-DS-Peligro-S%C3%ADsmico-parte-1.pdf>

Nehme, R. P. (2011). *ESTRUTURA E FORMA: A valorização do aspecto construtivo, o terceiro Vilanova Artigas*. (Tesis de maestría). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Nobre, A. L. (2007). Um em dois. As casas do Butantã de Paulo Mendes da Rocha. *Vitruvius*. Recuperado de: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/08.086/228>

Nobre, A. L. (2011). A Feira Mundial de Bruxelas de 1958: o Pavilhão Brasileiro. *ARQTEXTO*, (16), 98-107.

O

Oakley, T. (2006). *Escolas públicas em São Paulo (1960-1972)*. (Trabajo de iniciación científica). FAPESP,

São Paulo.

Oechslin, W. (1986). Premises for the Resumption of the Discussion of Typology. *Assemblage*, 36-53. doi: <https://doi.org/10.2307/3171053>

Oñate, E. (2009). *Structural Analysis with the Finite Element Method: Linear Statics. Volume 1. Basis and Solids*. Netherlands: Springer.

Oñate, E. (2013). *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics. Volume 2. Beams, Plates and Shells*. Netherlands: Springer.

Ortín Soriano, P. (2016). *La geometría como mecanismo compositivo en la historia de la arquitectura: la retícula en la arquitectura moderna*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Otondo, C. (2016). *Casa Butantã - Paulo Mendes da Rocha*. Ubu Editora. São Paulo.

P

Pepper, D. W., & Heinrich, J. C. (2017). *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with MATLAB®, MAPLE, and COMSOL* (3. Ed.). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315395104>

Perrone, R. A. C. (2014). Estrategias proyectuales de Paulo Mendes da Rocha. El anexo del Mube. *EN BLANCO. Revista de Arquitectura*, 6(15), 110-114.

Perugini, P., & Andreani, S. (2013). PIER LUIGI NERVI'S COLUMNS: FLOW OF LINES AND FORCES. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION*

FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 54(176), 12.

Piñón, H. (2003). Paulo Mendes da Rocha. Edicions UPC. Barcelona.

Piñón, H., (2009). Proyectar es construir. *helio-piñón.org*. Recuperado de: https://helio-pinon.org/escritos_y_conferencias/det-proyectar_es_construir_i58184

Pisani, D. (2013). Paulo Mendes da Rocha: a formação de um horizonte discursivo no início da carreira do arquiteto. *Projeto Design*, 405, 49-55.

Projective Cities. (2015). *Divine Character: The Evolution Of Religious Architecture*. Londres. Recuperado el 13 de junio de 2020 de: <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/divine-character-the-evolution-of-religious-architecture/>

Projeto 02:122.15-001. Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento, Rio de Janeiro, Brasil, 2006. Recuperado de: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/upload/>

R

Real Academia Española. (s.f.). Cultura. En Diccionario de la lengua española. Recuperado en 22 de octubre de 2019, de <https://dle.rae.es/algoritmo>

Rebello, Y. C. P. (2007). *Bases para projeto estrutural na arquitetura*. Zigurate Editora. São Paulo.

Rebello, Y. C. P. (2011). *Entrevista con Rita de Cássia Pereira Saramago*. Recuperado de [https://teses.usp.](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-31052011-101630-pt-br.php)

[br/teses/disponiveis/18/18141/tde-31052011-101630-pt-br.php](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-31052011-101630-pt-br.php)

Rebello, Y. C. P., & D'Azevedo, M. A. D. F. (2015). Considerações sobre o ensino e aprendizagem de estrutura nas escolas de Arquitetura. *Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo*, 15. doi: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n15.2015.01>

Reis Filho, N. G. (1968). Implantação de residências de maior porte 1920-1940. *Revista Acrópole*. (354), 37-39. Recuperado de <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/354>

Reis Filho, N. G. (1968). Condições de implantação da arquitetura urbana 1940-60. *Revista Acrópole*. (355), 39-41. Recuperado de <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/355>

Rey Rey, J. (2016). Collaboration between architects and structural engineers: A history of major successes and major failures. En P.J. da Souza Cruz (Ed.), *Structures and architecture: New concepts, applications and challenges* (pp.1383-1391). Londres: Taylor & Francis Group.

RMIT University. (s.f.). *Section Properties. Introduction*. Melbourne. Recuperado el 15 de junio de 2019: https://emedia.rmit.edu.au/dlsweb/Toolbox/buildright/content/bcgb4010a/03_properties/02_section_properties/page_001.htm

RMIT University. (s.f.). *Section Properties. Radius of gyration (r)*. Melbourne. Recuperado el 15 de junio de 2019 de: https://emedia.rmit.edu.au/dlsweb/Toolbox/buildright/content/bcgb4010a/03_properties/02_

[section_properties/page_009.htm](https://emedia.rmit.edu.au/dlsweb/Toolbox/buildright/content/bcgb4010a/03_properties/02_section_properties/page_009.htm)

RMIT University. (s.f.). *Section Properties. Section modulus (Z)*. Melbourne. Recuperado el 15 de junio de 2019 de: https://emedia.rmit.edu.au/dlsweb/Toolbox/buildright/content/bcgb4010a/03_properties/02_section_properties/page_009.htm

Rosato, D., & Rosato, D. (2003). *Plastics Engineered Product Design*. Elsevier Science.

Roxo, F. (2019). Casa Butantã - Paulo Mendes da Rocha. Recuperado 3 de septiembre de 2019, de http://cadernoteca.polignu.org/wiki/Casa_Butant%C3%A3_-_Paulo_Mendes_da_Rocha

S

Sá, D., Wisnik, G., & Simões, J. C. (2018). *Futuro Desenhado: ou Textos Escolhidos de Paulo Mendes da Rocha*. Monade Books. Lisboa.

Saint, A. (2007). *Architect and engineer: a study in sibling rivalry*. New Haven, London: Yale University Press.

Salvadori, M. (1958). Teaching Structures to Architects. *Journal of Architectural Education* (1947-1974), 13(1), 5-8. doi: <https://doi.org/10.2307/1424174>

Sandaker, B. N. (2008). *On span and space: Exploring structures in architecture*. Routledge.

Sanvitto, M. L. A. (1994). *Brutalismo Paulista: Uma análise composicional de residências paulistas entre 1957 e 1972*. (Tesis de maestría). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.



Sanvitto, M. L. A. (2013). BRUTALISMO PAULISTA: UMA ESTÉTICA JUSTIFICADA POR UMA ÉTICA?. X SEMINÁRIO DO COMOMO BRASIL. ARQUITETURA MODERNA E INTERNACIONAL: conexões brutalistas 1955-75, 24.

Saramago, R. de C. P. (2011). *Ensino de estruturas nas escolas de arquitetura do Brasil*. (Tesis de doctorado). Universidade de São Paulo. São Paulo. doi: <https://doi.org/10.11606/D.18.2011.tde-31052011-101630>

Schwartz, J. (2011). *Tragwerksentwurf I*. (Cátedra de Diseño Estructural. Invierno 2011). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. 67.

Segawa, H. (1998). La Invención de Brasil: Lucio Costa 1902-1998. *Arquitectura Viva*, (61), 74-75.

Semper, G. (2004). *Style in the Technical and Tectonic Arts, or, Practical Aesthetics*. Getty Research Institute, Los Ángeles.

Silva, J., & Ferreira, P. (2017). Os sentidos do morar em três atos: representação, conforto e privacidade. *Pós. Revista Do Programa De Pós-Graduação Em Arquitetura E Urbanismo Da FAUUSP*, 24(44), 68-87. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v24i44p68-87>

Silver, P., McLean, W., & Evans, P. (2013). *Structural engineering for architects: A handbook*. Londres, Inglaterra: Laurence King Publishing Ltd.

Solot, D. C. (1999). A paixão do início na arquitetura de Paulo Mendes da Rocha. III SEMINÁRIO DO COMOMO BRASIL. A PERMANÊNCIA DO MODERNO, 13.

Szambien, W. (1982). The nature of tectonic architecture and structural design. En R. Middleton (Ed.), *The Beaux-Arts and Nineteenth-Century French Architecture* (pp.19-33). Londres: Thames & Hudson.

T

Thomaz, D. (2005). *Artigas: a liberdade na inversão do olhar; modernidade e arquitetura brasileira*. (Tesis de doctorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.

Tunes, G. A. (2014). *A estrutura como escultura: O pilar em Vilanova Artigas*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo.

U

Unwin, S. (1997). *Analysing Architecture*. Routledge.

V

Valentim, F. R. (2003). *Casas para o ensino: as escolas de Vilanova Artigas*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo.

Vidler, A. (2000). Diagrams of Diagrams: Architectural Abstraction and Modern Representation. *Representations*, 72, 1-20. <https://doi.org/10.2307/2902906>

Villac, M. I. (2016). Técnica, arte e questões fundamentais da existência. Considerações sobre o discurso de Paulo Mendes da Rocha. *Pós. Revista Do Programa de Pós-Graduação Em Arquitetura e Urbanismo Da FAUUSP*, 23(39), 90-100. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v23i39p90-100>

Viollet-le-Duc, E-E. (1987). *Lectures on Architecture in Two Volumes*. Dover Publications, Inc., Nueva York.

Viollet-le-Duc, E-E. (2018). *Entretiens sur l'architecture*. Wentworth Press, Nueva York.

Vitruvio Polión, M. (1995). *Vitruvio: Los diez libros de arquitectura*. Alianza Editorial. Madrid.

W

Wainwright, O. (2017, 4 febrero). «One never builds something finished»: the brutal brilliance of architect Paulo Mendes da Rocha. Recuperado 16 de agosto de 2019, de <https://www.theguardian.com/artanddesign/2017/feb/04/why-paulo-mendes-da-rocha-raises-architecture-to-a-new-level>

Wisnik, G., (2004). Modernidade congênita. En A. Forty & E. Andreoli (Ed.), *Arquitetura Moderna Brasileira*. (pp. 20-55). Londres: Phaidon.

Wisnik, G. (2006). O programa escolar e a formação da “escola paulista”. En Ferreira A. de F.; Mello, M. G., *Arquitetura Escolar Paulista: anos 1950 e 1960*. (p. 59). São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE).

Wisnik, G. (2008). “Arquitectura del territorio”. En *Revista 2G Nº45*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.

Wisnik, G., (2010). Vilanova Artigas and the dialectics of stress. *2G - Revista internacional de arquitectura*. (54), 11-24.

Wisnik, G. (2015). ARTIGAS E A DIALÉTICA DOS ESFORÇOS. *Novos estudos CEBRAP*, (102), 149-165.

Wisnik, G. [Itaú Cultural]. (2018, Septiembre 19). Contribuição em atos – Ocupação Paulo Mendes da Rocha (2018) [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=XbkQIKU8a84&t=200s>

Wolff, S. F. S. (1993). As Escolas Públicas Paulistas da Primeira República e seus Arquitetos. *Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP*, 4, 92-106. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v0i4p91-106>

Y

Yu, G., Asce, M., Chock, G., & Asce, F. (2016). Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures. Recuperado el 15 de Noviembre, 2019, de: <http://www.eventscribe.com/2016/CECAR7/assets/pdf/268163.pdf>

Z

Zein, R. V. (2005). *A ARQUITETURA DA ESCOLA PAULISTA BRUTALISTA 1953-1973*. (Tesis de doctorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Zein, R. V., & Amaral, I. (2011). A Feira Mundial de Osaka de 1970: o pavilhão brasileiro. *ARQTEXTO*, (16), 108–127.

Zein, R. V. (2012). ¿Brutalismo? Un nombre polémico y su uso para designar una tendencia pasada en la arquitectura brasileña. *EN BLANCO. Revista de Arquitectura*, 4(9), 6-13. doi: <https://doi.org/10.4995/eb.2012.6844>